الجمهورية العربية السورية

جامعة البعث

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم القوى الميكانيكية



استخدام المواد ذات الطور المتغير في العزل الحراري للواجهات الزجاجية للأبنية الحديثة

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الميكانيكية

إعداد

المهندس: هاشم المحفوض

2009



الجمهورية العربية السورية

جامعة البعث

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم القوى الميكانيكية

استخدام المواد ذات الطور المتغير في العزل الحراري للواجهات الزجاجية للأبنية الحديثة

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الميكانيكية

إعداد

المهندس: هاشم المحفوض

إشراف

الدكتور المهندس : سهيل حنا

الأستاذ في قسم القوى الميكانيكية –كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية –جامعة البعث

نوقشت هذه الرسالة بتاريخ 21/1/2009 و أجيزت

أعضاء لجنة الحكم :

الأستاذ الدكتور :سهيل حنا كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية–جامعة البعث

(الأستاذ المشرف)

الأستاذ الدكتور :محمد بري العبيد كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية–جامعة البعث

(عضواً)

الأستاذ الدكتور :أيوب حسن كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية–جامعة تشرين

(عضواً)

الإهداء

إلى كل من علمني حرفاً

كلمة شكر

إلى من رسم طريقي و أناره ....وأمدني بالعلم و أفاضه..................

وكان بسعة اطلاعه وثقافته ومعرفته ...خير معلم وخير موجه وخير مرشد.......

إلى من قدم لي كل ما أطمح إليه ولم يبخل علي يوماً بثمرة تعبه وخالص خبرته...

إليك أيها المعلم الفاضل أقف احتراماً وتقديراً وتبجيلاً..............

ولا يسعني إلا أن أقدم لك خالص الشكر والامتنان...............

أستاذي الدكتور المهندس

سهيل عبد الله حنا

الذي عطرت يداه بحثي هذا ....

كما أخص بالشكر كلاً من عميد كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية الأستاذ الدكتور عدنان يونس و رئيس قسم هندسة القوى الميكانيكية الأستاذ الدكتور محمد بري العبيد لما قدماه من تسهيلات لإنجاح هذا العمل....

شكر خاص و امتنان للدكتورة مها أحمد- جامعة تشرين

م . هاشم

بسم الله الرحمن الرحيم

" وقل ربي زدني علماً "

صدق الله العلي العظيم

الفهرس

ترتيب الأطروحة

لقد تم ترتيب الأطروحة في مقدمة و خمسة فصول رئيسية : فقد ضم الفصل الأول أسس و مبادئ التصميم الحراري للأبنية إضافة إلى العوامل التي تؤثر في التصميم الحراري و لمحة عن المبادئ النظرية للأنظمة السلبية.

في الفصل الثاني تم البحث في مواد تخزين الطاقة الكامنة حيث قمنا بتصنيف هذه المواد حسب أنواعها و تم ترتيبها في جداول مع ذكر بعض الخصائص الحرارية المميزة لها و سلبيات و إيجابيات كل نوع من هذه المركبات.

أما الفصل الثالث فقد خصص لدراسة أنظمة تخزين الطاقة الكامنة في مختلف التطبيقات الحرارية سواء في تخزين الطاقة الشمسية أو في تدفئة و تكييف الأبنية أو تدفئة البيوت الزجاجية الزراعية........
و قد استعرضنا أغلب الأبحاث و التجارب التي أجراها من سبقونا في هذا المجال مع ذكر ملخص لهذه الأبحاث و للنتائج التي توصلوا لها.

في الفصل الرابع تم إجراء دراسة تحليلية نظرية لعملية انتقال الحرارة في الواجهات الزجاجية و قد تم استنتاج إلى معادلات تمكننا من حساب مختلف البارامترات التي تؤثر في عملية انتقال الحرارة عبر الواجهة .

و خصص الفصل الخامس للدراسة التجريبية لإمكانية اعتماد طريقة جديدة تمكننا من تخفيض الضياعات الحرارية عبر الواجهة باستخدام مواد PCM و ضم مراحل العمل المخبري و التجريبي الذي قمنا به مع النتائج التي توصلنا إليها مع التوصيات و المقترحات التي تسهم في تطوير الأبحاث المقبلة .

Syrian Arab republic
Al-baath University
Department of Mechanical Powers Engineering



Phase change materials implementation in glass façade for thermal insulation in modern buildings

Thesis Submitted For.M.Sc.degree in

Mechanical Powers Engineering

By

Hashem AL -Mahfood

Supervised by

Dr.Eng. Sohiel Hanna

2009

I- مقدمة

تعتبر الطاقة الشمسية أهم مصادر الطاقة الطبيعية التي اتجهت إليه الأنظار ، فهي طاقة دائمة لا تنضب اقتصادية و نظيفة وقد ازداد الاهتمام بالاستثمار الأمثل لهذه الطاقة في كافة القطاعات ،لاسيما في الوقت الحالي فارتفاع أسعار المصادر التقليدية للطاقة والأزمات المتكررة إضافة إلى المشكلات البيئية الناجمة عن التلوث الناتج عنها سواءً كان التلوث حراري (الاحتباس الحراري) أو فيزيائي أو كيميائي ، جعل من تخفيض استهلاك الطاقة في كافة القطاعات ضرورة هامة و ملحة و ذلك على الرغم من حاجة المجتمعات المدنية الحديثة إلى مستوى معين من النظافة و الراحة و التي تتطلب إنتاج و استهلاك الطاقة .

يلعب العزل الحراري في المباني دوراً أساسياً في التقليل من استهلاك الطاقة و قد ازدادت أهميته في وقتنا الراهن بسبب أزمة الطاقة و الازدياد الكبير لاستهلاك الطاقة في قطاع البناء. ففي عام 2000أصبح قطاع البناء بالتساوي مع القطاع الصناعي أول مستهلك للطاقة في العالم بنسبة.28%

- في فرنسا مثلاً تقدر هذه النسبة ب(45.8%) و قسم كبير من هذه النسبة سببه آلات التدفئة و التكييف.
- في بلد كالمملكة العربية السعودية نصف مرافق و محطات الكهرباء مسخر بصورة أساسية لتشغيل أجهزة التدفئة و التكييف.

و مهما كانت طبيعة و فعالية أجهزة التكييف و التدفئة ، فإن أفضل طريقة من أجل تخفيض حاجة الأبنية للطاقة هي تخفيض الضياعات الحرارية و كنتيجة لذلك تحسين العزل الحراري للجدران و الواجهات .

و قد اتجهت العديد من الدول للحد من زيادة استهلاك الطاقة في قطاع البناء نحو بناء أبنية اقتصادية حديثة ذات سماكة جدران قليلة و مواصفات عزل حراري عالية إضافة إلى الاستفادة أعظم ما يمكن من مصادر الطاقة السلبية.

تمثل الواجهة الزجاجية الحد الأضعف في هيكل البناء الذي يفصل الوسط الداخلي للبناء عن الوسط الخارجي . ففي الأوقات الباردة تقدر نسبة الضياعات الحرارية التي تحدث عبرها بحدود 10-25% من الضياع الحراري الإجمالي للمكان المدفأ ، أما في الأوقات الحارة فالإشعاع الشمسي الزائد النافذ عبرها عادة ما يقود إلى زيادة في حمل التكييف .

لهذه الأسباب و لأسباب أخرى فقد تم تكريس الكثير من الجهد والبحث و ذلك للوصول إلى تصميم واجهات زجاجية اقتصادية وفعالة من الناحية الحرارية وقادرة على الحفاظ على مستوىً مناسباً من الارتياح الحراري .

II- الهدف من الدراسة

الهدف من البحث هو دراسة إمكانية استخدام المواد ذات الطور المتغير في الواجهات الزجاجيـــة للأبنية الحديثة و الأثر الذي يمكن أن تلعبه هذه المواد في تحسين درجات الحرارة الداخلية للأبنية و زيادة الشعور بالارتياح الحراري و ذلك من خلال التحكم بكمية الإشعاع الشمسي النافذ عبــر هــذه الواجهات إلى داخل البناء إضافة إلى التحكم بشكل سلبي بدرجة الحرارة الداخلية للغرفة سواءً مــن خلال قيام مواد (PCM) بتخزين الطاقة المستمدة من أشعة الشمس في الواجهة بشكل محسوس و بشكل كامن ومن ثم الاستفادة من الطاقة المخزنة في تعديل درجات الحرارة الداخلية للبناء أو مــن خلال تقليل كمية الطاقة الشمسية النافذة إلى داخل المبنى.

تم في هذا البحث:

1-إجراء دراسة تحليلية معمقة لجميع المعلومات والدراسات والمراجع المتعلقــة بمــواد (PCM) و تطبيقاتها حيث قمنا بتصنيف هذه المواد في جداول بحســب خواصــها ونوعهــا ،إضــافة إلــى استخداماتها في التطبيقات المختلفة.

2- إجراء دراسة تحليلية رياضية لعملية انتقال الحرارة في الواجهة الحاوية علــى مــواد (PCM) وذلك بالاعتماد بشكل أساسي على معادلات التوصيل الحراري ضمن المواد التي تغير من حالتهــا الطورية.

3- إجراء دراسة تجريبية مخبرية لاختيار مادة (PCM) المناسبة والتي تحقــق أفضــل الشــروط الحرارية و الاقتصادية.

4- دراسة تجريبية لنموذج غرفتين (خليتين تجريبيتين) الأولى ذات واجهة تحوي مــواد (PCM) والثانية ذات واجهة عادية استخدمتها كمرجع للمقارنة مع الخلية الأولى .

الفصل الأول

أسس و مبادئ التصميم الحراري للأبنية

Principles of Thermal design for buildings

الفصل الأول

أسس و مبادئ التصميم الحراري للأبنية

1-1مقدمة (Introduction) [37]

يلعب التصميم الحراري الجيد للأبنية دورًا رئيسًا في تخفيض الأحمال الحرارية لأنظمة التدفئة والتكييف، وبالتالي تخفيض استهلاك الطاقة، وتخفيض التكاليف التأسيسية لتلك الأنظمة وما تتطلبه من تكاليف تركيب وصيانة دورية.

1-2الغاية والهدف من التصميم الحراري

يجب ان يهدف التصميم الحراري الأمثل للمباني إلى مايلي:

1- توفير الطاقة المستخدمة لأغراض التدفئة والتكييف.

2- تخفيض الضياع الحراري. .

3- تخفيض الكلفة التأسيسية والصيانة لأجهزة وتمديدات أنظمة التدفئة وتكييف الهواء.

4- تأمين شروط الارتياح الحراري والأجواء الصحية لشاغلي البناء طيلة فصول السنة.

5-تجنب حدوث التكاثف أو التقليل منه على السطوح الداخلية للبناء في المناطق الباردة عند استخدام التدفئة وتجنب الأضرار الناجمة عن ذلك.

6- تخفيض كلفة الصيانة الدورية الناتجة عن الإجهادات الحرارية للمباني.

7-إطالة العمر التشغيلي للبناء.

1-3 العوامل المؤثرة في التصميم الحراري

1-3-1الظروف الجوية

قبل البدء بعمليات التصميم يجب تحديد ما يلي:

المتطلبات التصميمية اللازم توفرها داخل البناء وتتضمن ما يلي:

- درجات الحرارة الجافة التصميمية.
- الرطوبة النسبية التصميمية.
- معدل التهوية التصميمي.
- المتطلبات التصميمية الخارجية السائدة صيفاً وشتاءًا لكل منطقة مناخية.
- سرعة الرياح التصميمية واتجاهها.
- شدة الأشعة الشمسية وزاوية سقوطها.

1-3-2 الاتجاه الجغرافي وشكل البناء وموقعه:

يؤثر الاتجاه الجغرافي للبناء وشكله وموقعه على مقدار الفقد والكسب الحراري عبر عناصره الخارجية وفق التالي:

أ - الاتجاه الجغرافي:

كلما ازدادت سرعة الرياح انخفضت المقاومة الحرارية السطحية الخارجية لعناصر البناء وبشكل خاص سطوح العناصر المواجهة لها، إضافة لازدياد إمكانية تسرب الهواء إلى داخله من خلال فواصل الأبواب والنوافذ.

كما تعتبر أشعة الشمس المباشرة مصدرا حراريا إضافيا يمكن الاستفادة منه في فصل الشتاء.

وبناء على ذلك يجب مراعاة ما يلي أثناء التصميم:

- التقليل قدر الإمكان من مساحات الأبواب والنوافذ والواجهات المعرضة للرياح السائدة مع ضرورة تزويدها بواقيات كالمظلات الخارجية والستائر.

- الاستفادة المثلى من مساحات النوافذ والأبواب والواجهات الزجاجية المعرضة بشكل مباشر لأشعة الشمس شتاء.

- اتخاذ التدابير اللازمة لحجب أشعة الشمس من الدخول إلى البناء صيفا، والسماح بدخولها شتاء باستخدام مظلات واقية.

ب - شكل البناء وموقعه:

*اختلاف موقع البناء:

يتعرض البناء الذي يقع على قمة مرتفعة للرياح وأشعة الشمس والأمطار أكثر مما لو كان واقعًا في واد منخفض ، كما يتعرض البناء الذي يقع على السفح المواجه للرياح السائدة إلى تأثيرها أكثر من وقوعه على السفح المعاكس.

*موقع البناء من الأبنية المجاورة:

إن وجود البناء ضمن مجمع سكني كثيف يخفف من تأثير شدة الرياح والأمطار وأشعة الشمس عليه.

***ارتفاع البناء:**

إن زيادة ارتفاع البناء عن باقي الأبنية المجاورة والمحيطة به يجعله عرضه لمواجهة الرياح والأمطار المباشرة أكثر مما لو كان متساويا في الارتفاع معها.

وبشكل عام، فكلما كان البناء أكثر تعرضا لعوامل الجو الخارجية، تطلب ذلك اهتماما أكبر في عمليات التصميم من حيث الشكل المعماري ونسبة الفتحات والواجهات الزجاجية واتجاهاتها و طريقة عزلها ونوعية المواد المستخدمة في الجدران والسقوف للعناصر والأرضيات وسماكاتها وترتيب طبقاتها.

1-4 الارتياح الحراري

يعتبر الارتياح الحراري وتأمين الجو الصحي المريح من أهم الأهداف التي يسعى إليها التصميم الحراري للبناء.

ويعرف الارتياح الحراري بأنه (الحالة الذهنية التي يشعر فيها الإنسان بالرضى والنشاط في البيئة الحرارية المحيطة به) ويتحدد مستوى الارتياح بمجموعة من العوامل المؤثرة على الحالة الفيزيولوجية للإنسان في الحيز الذي يعيش فيه، حيث يصبح الشخص في حالة ارتياح حراري إذا كانت معدلات الطاقة التي ينتجها الجسم بما يتناوله من غذاء أو ما يسمى بالتفاعل الحيوي تعادل تلك التي يفقدها إلى الجو المحيط، ويعبر عن هذه الحالة أيضًا بالاتزان الحراري

أما العوامل المؤثرة على الارتياح الحراري للإنسان فهي:

عوامل مرتبطة بالإنسان نفسه:

- نوع النشاط :تتعلق معدلات الطاقة الحرارية الناتجة عن التفاعل الحيوي لجسم الإنسان والتي يقوم بتبديدها في الجو المحيط بنوع النشاط الذي يمارسه كما هو مبين في الجدول (1-1):

نوع النشاط	كمية الحرارة (واط/شخص)
النوم	70
الجلوس مع حركة خفيفة	130-160
الوقوف مع عمل خفيف	160-190
الجلوس مع حركة كثيفة	190-230
الوقوف مع عمل معتدل وحركة خفيفة	230-290
المشي مع حمل أو رفع أشياء خفيفة	290-410
عمل كثيف متقطع	440-580
عمل شاق محتمل	580-700
عمل شاق بأقصى حد لمدة 30 دقيقة	1100
القيم أعلاه هي قيم متوسطة من عدة مصادر وهي تشمل مجموع الحرارة المحسوسة و الكامنة	

الجدول (1-1)كمية الحرارة المكتسبة الصادرة عن جسم الإنسان حسب نوع النشاط المبذول

- الملابس :يحدد نوع اللباس الذي يرتديه الإنسان كمية الحرارة التي يفقدها الجسم إلى الوسط المحيط، وتنقص هذه الكمية بازدياد سماكة هذه الملابس ومقدرتها على عزل الحرارة.

عوامل مؤثرة ذات ارتباط مباشر بالظروف البيئية المحيطة:

- درجة حرارة الهواء (°C) , (AIR Temperature)
- الرطوبة النسبية Relative Humidity (%)
- حركة أو سرعة الهواء AIR Velocity (m/s)
- متوسط الحرارة الإشعاعية Mean Radiant Temperature (°C)

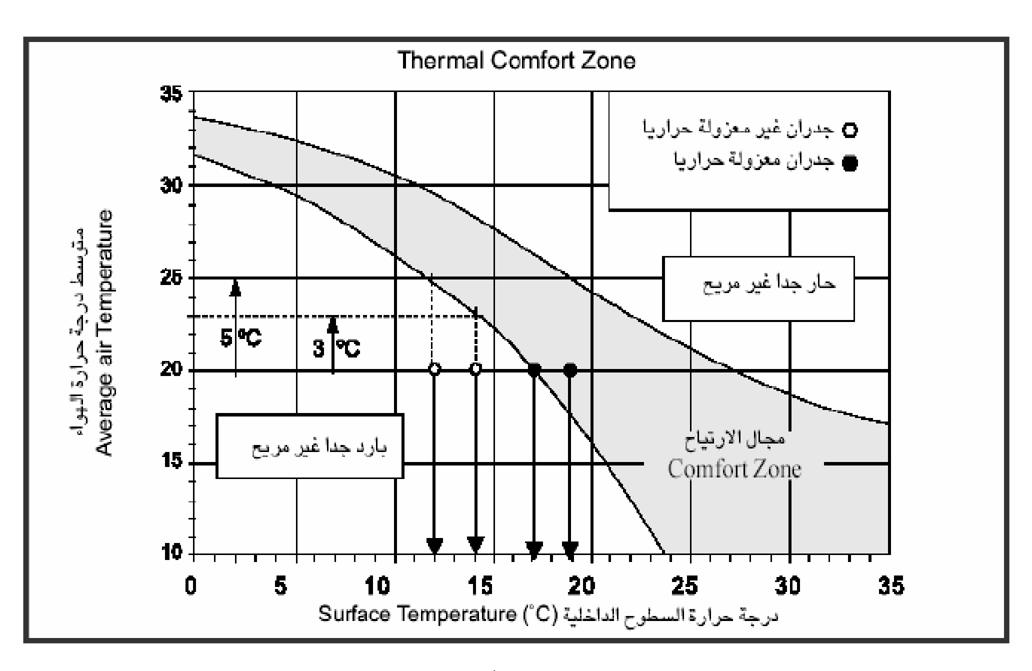
يمكن التحكم عمليًا بالعوامل الثلاثة الأولى المذكورة أعلاه بواسطة أجهزة التدفئة والتكييف والتهوية الصناعية للوصول إلى المستويات المرغوب فيها، إلا أن درجة الحرارة الإشعاعية تتعلق مباشرة بدرجة حرارة السطوح الداخلية لعناصر البناء المحيطة بحيز الإقامة كالجدران والسقف والواجهات

الزجاجية والتي لا يمكن التحكم بها وتقليل أثرها السلبي إلا عن طريق التصميم الحراري لهذه العناصر بعزلها حراريًا بطريقة مناسبة، ويجري تحديد مستوى الارتياح الحراري للعوامل المؤثرة المذكورة أعلاه بأشكال بيانية تبين مجال الارتياح الحراري الذي يقع فيه هذا المستوى.

يبين الشكل/1−1/ منطقة الارتياح الحراري الأعظمي تبعاً لدرجة حرارة الهواء داخل حيز الإشغال و درجة حرارة السطوح الداخلية لعناصر البناء.

فعلى سبيل المثال إذا كانت درجة حرارة الهواء داخل بناء غير معزول حراريًا شتاء تساوي 20°C و متوسط درجة حرارة السطوح الداخلية لعناصر البناء تساوي12°C فإن الإقامة داخل هذا البناء غير مريحة بسبب ازدياد كمية الطاقة الإشعاعية الصادرة عن جسم الإنسان إلى السطوح الداخلية الباردة لعناصر البناء والتي تشكل الجزء الأكبر من الطاقة الحرارية التي يفقدها جسم الإنسان مما يؤدي إلى حدوث خلل في الاتزان الحراري.مما يتطلب رفع درجة حرارة الهواء داخل البناء عدة درجات للدخول في مجال الارتياح الحراري والذي يعني هدر المزيد من الطاقة.

أما في حالة العزل الحراري الجيد لعناصر هذا البناء فإن قيمة درجة حرارة السطوح الداخلية لعناصره تكون قريبة من قيمة درجة حرارة الهواء داخل البناء وتقع ضمن مجال الارتياح الحراري.



الشكل/1-1/ منطقة الارتياح الحراري الأعظمي تبعاً لدرجة حرارة الهواء داخل حيز الإشغال و درجة حرارة السطوح الداخلية لعناصر البناء

ومن جهة أخرى يبين الشكل الحدود القصوى للارتياح الحراري التي يجب مراعاتها في تصميم العناصر الخارجية للبناء بهدف الوقاية الحرارية في فصل الصيف.

1-5 المبادئ النظرية للأنظمة السلبية

إن الحمل الحراري لتدفئة المباني يتعلق بعدة عوامل مرتبطة بالمناخ –الخواص البنيوية و الفيزيو– حرارية للبناء–طريقة التدفئة–عادات المستثمرين .

إن الطرق التقليدية للحساب تأخذ بعين الاعتبار الضياعات الحرارية عبر حواجز البناء عن طريق النفوذ و التسرب . و لا تأخذ بعين الاعتبار الربح من الإشعاع الشمسي و لهذا السبب الفعالية الحرارية للأنظمة التقليدية تعتبر أفضل و من الصعب مقارنتها بالأنظمة السلبية .

و تنحصر محاسن التدفئة الشمسية السلبية فيما يلي:

1–التقاط الإشعاعات الحرارية الخارجية.

2–تخزين الطاقة الملتقطة.

3–توزيع الأحمال الطاقية و الحرارية

4–التحكم بالأحمال الحرارية لتامين الارتياح الحراري و تخفيض الضياعات الحرارية.و لتأمين ما سبق لا بد من الاهتمام بالمبادئ الفيزيائية التي تأخذ بعين الاعتبار:

– الإشعاع الشمسي على سطح مائل

–المواصفات الفيزيائية للمواد الشفافة و غير الشفافة

– التوصيل الحراري غير المستقر

– التبادل الحراري الإشعاعي

–حركة الهواء في حالة الحمل الحر.

الفصل الثاني

مواد تخزين الطاقة الكامنة

Latent Heat Storage Materials

الفصل الثاني

مواد تخزين الطاقة الكامنة

2-1 مقدمة (Introduction):

إن استخدام أنظمة تخزين الطاقة الحرارية بالطريقة الكامنة باستخدام المواد ذات الطور المتغير (PCM) هي طريقة فعالة جداً لتخزين الطاقة الحرارية بمختلف مصادرها (طاقة شمسية- الحرارة الضائعة في التطبيقات الصناعية – الكهرباء الرخيصة ....) . و لهذه الطريقة مزايا عدة مثل كثافة التخزين العالية ، التخزين عند درجات حرارة ثابتة . وقد بات واضحاً أنه لتطوير أنظمة التخزين بالطاقة الكامنة فإن اختيار المادة المناسبة من مواد (PCM) إضافة إلى الآلية التي تتم بها عملية انتقال الحرارة يلعبان دوراً هاماً لنجاح عمل النظام . لقد تم نشر الكثير من المعطيات و المعلومات عن مواد تخزين الطاقة الحرارية بالطريقة الكامنة و أنظمتها . ولقد بذلنا جهداً كبيراً في هذه الأطروحة لجمع كل المعلومات المتوفرة عن الأعمال و الأبحاث السابقة لمواد (PCM) و أنظمة تخزين الطاقة الكامنة .

يقوم العلماء حول العالم بالبحث الدؤوب عن مصادر جديدة و متجددة لتخفيض استهلاك الطاقة و التقليل من انبعاث غاز CO2 الناتج عن استهلاك المصادر التقليدية للطاقة ، و خصوصاً في التطبيقات العاملة عند درجات حرارة منخفضة .ومن المحتمل أن تكون الطاقة الشمسية إحدى أهم المصادر الواعدة سواءً في تدفئة وتكييف الأبنية ،تأمين الماء الصحي الساخن المنزلي و الصناعي ، أغراض الطبخ، تدفئة البيوت البلاستيكية الزراعية .... ولكن الطاقة الشمسية متقطعة ولا يمكن التنبؤ بها كما أنها متوفرة فقط خلال النهار . و بالتالي فإن استخدامها يتطلب نظام تخزين طاقة فعال بحيث يتم تخزين الفائض من الطاقة الشمسية التي يتم جمعها خلال ساعات النهار لاستخدامها فيما بعد عند الحاجة لها.

ظهرت أيضاً مشاكل مشابهة في أنظمة استرجاع الحرارة ، حيث تكون أوقات توفر هذه الحرارة الضائعة تختلف عن أوقات الاستفادة منها ، وهذا أمر يتطلب نظاماً لتخزين الطاقة الحرارية .

يتم في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الشمسية نقل الطاقة المفيدة التي يتم جنيها في حقل اللواقط بواسطة الوسيط الناقل للحرارة إلى وسيط التخزين الذي يحولها بدوره إلى طاقة داخلية مخزنة . والتخزين هذا يمكن أن يتم إما بشكل طاقة كامنة أو بشكل طاقة محسوسة أو كليهما معاً . تكمن المشكلة الأساسية في التخزين المحسوس للطاقة في الحجم الكبير اللازم للتخزين ، خصوصاً عندما يكون التخزين ضمن مجال صغير لفرق درجات الحرارة . أما التخزين الكامن للطاقة فهو ملائم أكثر من التخزين المحسوس نظراً لكثافة التخزين العالية عند مجالات صغيرة لفرق درجات

الحرارة.على كل حال،يوجد العديد من المشاكل العملية المرتبطة بطريقة التخزين الكامن للطاقة وهذا عائد ل: الإيصالية الحرارية المنخفضة ، التغير في الخصائص الفيزيائية والحرارية خلال الدورات الحرارية المتعاقبة ،التبريد الزائد ، الإنصهار الغير متجانس ، التغير في الحجم عند التغير في الطور و التكلفة العالية . وهذه المشاكل يجب إيجاد الحلول التقنية لها قبل أن يتم استخدام التخزين بالطريقة الكامنة على أوسع نطاق . [6]

إن تخزين الطاقة بالطريقة الكامنة هو مجال حديث نسبياً و قد كان الباحث Dr.Telkes سباقاً في هذا المجال منذ أربعينيات القرن الماضي ولكن أبحاثه لم تجذب الانتباه كثيراً في البداية ، استمر ذلك حتى حصول أزمة الطاقة في سبعينيات القرن الماضي . أول ما استخدمت مواد (PCM) كان في حافلات القطارات في انكلترا وذلك للحماية من الصقيع . [1]

وقد تم إجراء الكثير من التجارب لاستخدامها في أنظمة التدفئة و التكييف للمباني ، وتم ذلك من قبل العديد من الباحثين مثل Telkes,1975 و Lane,1983 ,والأخير قد طرح فكرة استخدام مواد (PCM) في الجدران وفق مبدأ جدار ترومب.ولا تزال الأبحاث مستمرة لاستخدام مواد (PCM) في أنظمة الطاقة الشمسية [12,13]. ويتوجه الاهتمام حالياً على استخدام مواد إل(PCM) لاستعادة الحرارة الضائعة في التطبيقات الصناعية وفي محطات توليد الطاقة . [4]

2-2 طرق تخزين الطاقة Energy Storage Methods

يمكن تخزين مختلف أشكال الطاقة سواءً كانت هذه الطاقة ميكانيكية ، كهربائية، كيميائية أو حرارية ، فأنظمة تخزين الطاقة الميكانيكية تتضمن تخزين الطاقة بالاعتماد على الجاذبية الأرضية (الارتفاع)أو تخزين الطاقة بشكل هيدروليكي أو حتى تخزين الطاقة بالهواء المضغوط .

إن تخزين الطاقة في المدخرات هي إحدى طرق تخزين الطاقة الكهربائية ، حيث يتم شحن البطارية بوصلها بمصدر مباشر للتيار الكهربائي وعندما تفرغ تتحول الطاقة الكيميائية المخزنة إلى طاقة كهربائية . من التطبيقات المحتملة للتخزين في المدخرات هي أن يتم شحنها في الفترات التي يقل فيها استهلاك الكهرباء و تفريغها في فترات الذروة مما يقلل من الحمل خلال هذه الفترة .أيضاً يمكن أن تستخدم في تخزين الطاقة الكهربائية المولدة في محطات الطاقة الريحية أو في الخلايا الشمسية . من أكثر أنواع المدخرات انتشاراً والمستخدمة في تخزين الطاقة هي مدخرات (Lead acid) و (Ni-Cd) .

إن الطاقة الحرارية يمكن أن تخزن كتغير في الطاقة الداخلية للمادة بشكل حرارة محسوسة (sensible heat)،حرارة كامنة (latent heat) ، كيميا- حراري (thermo-chemical heat) أو بشكل مشترك بين الأشكال السابقة .

يتم تخزين الطاقة الحرارية في التخزين المحسوس للطاقة (SHS) عبر رفع درجة حرارة المادة . وأنظمة (SHS) تستفيد من السعة الحرارية للمادة و من التغير الذي يحدث في درجـــات الحـــرارة للمادة خلال عمليات الشحن والتفريغ . و تعتمد كمية الطاقة المخزنة على كل من : السعة الحرارية النوعية للوسيط والتغير في درجات الحرارة وكمية المادة ، وفقاً للعلاقة الرياضية التالية :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m.Cp.dT = m.Cp.(T_f - T_i)\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

أما التخزين الكامن للطاقة (LHS) فيعتمد على امتصاص و تحرير الحرارة عندما تتعرض مادة التخزين إلى تغير في حالتها الطورية ، من الطور الصلب إلى الطور السائل إلى الطور الغـــازي أو بالعكس .

تعطى كمية الطاقة المخزنة في نظام (LHS) باستخدام المواد ذات الطـــور المتغيـــر (PCM) كوسيط تخزين بالعلاقة :

$$\begin{aligned} Q &= m.a_m.\Delta h_m + \int_i^m mC_p dT + \int_m^f mC_p dT \\ &= m\left[a_m \Delta h_m + C_{sp}(T_m - T_i) + C_{lp}(T_f - T_m\right]\ldots\ldots\ldots\ldots(2) \end{aligned}$$

إن لأنظمة (LHS) مزايا عدة بالمقارنة مع أنظمة (SHS) . والميزة الأكثر أهميـــة هـــي كثافـــة التخزين العالية بواحدة الحجم وبواحدة الكتلة.

إن أنظمة التخزين الكيميا-حرارية(Thermo-chemical) تعتمـــد علـــى الحـــرارة الممتصـــة أو المتحررة عبر تحطم وإعادة تشكل الروابط الذرية في تفاعلات كيميائية عكوسة بالكامل . في هـــذه الحالة الطاقة الحرارية المخزنة تعتمد على كمية المادة و حرارة التفاعل و الفترة التي يستغرقها هذا التفاعل وفق العلاقة التالية .

$$Q = a_r.m\Delta h_r\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

من بين تقنيات تخزين الطاقة الحرارية ،تعتبر طريقة تخزين الطاقة الحرارية بالطريقة الكامنة مـــن أكثر الطرق جاذبية نتيجة قدرتها على تأمين كثافة تخزين طاقة عالية و القدرة على التخـــزين عنـــد درجة حرارة ثابتة نتيجة التحول الطوري لمواد التخزين(PCM).

إن التخزين بالطاقة الكامنة يمكن أن يتم عنـــد حـــدوث التحـــولات الطوريـــة للمـــادة ،/ صـــلب- سائل/،/سائل-غاز/، /صلب-غاز/،/صلب- صلب / . ولكن التحولين الطوريين العمليين فقط هما / صلب-سائل/ و/صلب- صلب /.[9]

إن لكل من التحول الطوري /صلب-غاز/ و التحول الطوري /سائل-غاز/ حرارة كامنة للانصهار أعلى و لكن التغيرات الكبيرة في الحجم التي تحدث للمادة عند انتقالها للطور الغازي يخلق مشاكل عديدة وخصوصاً في طريقة احتواءها(تخزينها) وهذا أمر يخرجها من إمكانية استخدامها في أنظمة تخزين الطاقة . كون التغير الكبير في الحجم يجعل النظام معقد وغير عملي .

في الانتقالات صلب- صلب ، يتم تخزين الطاقة الحرارية عندما تتحول المادة من توزع بلوري إلى توزع آخر. وبشكل عام يكون لهذا التحول حرارة كامنة أقل وتغيرات أقل في الحجم مقارنة مع ما يحصل في حالة التحول الطوري صلب- سائل .

من مزايا مواد (PCM) ذات الانتقال /صلب- صلب/ أنها لا تحتاج إلى متطلبات صارمة فيما يتعلق بطريقة احتوائها وبالتالي تعطي مرونة أفضل في تصميم خزاناتها. [11]

إن للتحول الطوري /صلب- سائل/ حرارة كامنة أقل بالمقارنة مع التحول الطوري /سائل- غاز/ ،و على كل حال هذه التحولات الطورية تستلزم تغيراً صغيراً في الحجم (<10%) . ولقد ثبت أن التحول الطوري /صلب- سائل/ أفضل من الناحية الاقتصادية للاستخدام في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية .

وبشكل عام فإن أي نظام تخزين بالطاقة الكامنة يجب أن يحقق على الأقل المتطلبات الثلاثة التالية :

1- أن تكون المادة ذات الطور المتغير مناسبة بحيث تكون درجة حرارة التغير الطوري لها ضمن المجال المرغوب.

2- سطح تبادل حراري مناسب.

3- خزان مناسب يكون متوافق مع مادة إل(PCM) التي تم اختيارها .

2-3 مواد تخزين الطاقة الكامنة Latent Heat Storage Materials

إن المواد ذات الطور المتغير(PCM) هي مواد لتخزين الحرارة الكامنة . فعندما ترتفع درجة حرارة هذه المواد تتفكك الروابط الكيماوية داخل مواد (PCM) نتيجة التغير الطوري و تتحول من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة (كما هي الحالة التي تحصل لمواد (PCM) التي هي مجال اهتمامنا حالياً) .إن التحول الطوري هو عملية تتطلب الحرارة و لذلك فمواد إل(PCM) سوف تمتص الحرارة ، وكون تخزين الحرارة يتم في مادة التخزين فالمادة ستبدأ بالإنصهار عند الوصول إلى درجة حرارة التغير الطوري و ستبقى درجة الحرارة ثابتة حتى انتهاء عملية الإنصهار للمادة. يتم تخزين الحرارة خلال عملية التحول الطوري (الإنصهار) و تسمى الحرارة المخزنة هذه بالحرارة الكامنة .

إن لتخزين الطاقة بالحرارة الكامنة ميزتين أساسيتين :

- يمكن تخزين كمية كبيرة من الحرارة عند تغير صغير في درجات الحرارة و لذلك فمواد التخزين هذه لها كثافة تخزين عالية.
- تخزين الطاقة الكامنة يتم عند درجة حرارة ثابتة هي درجة حرارة التحول الطوري للمادة.

إن المقارنة بين تخزين الحرارة بالطريقة الكامنة والطريقة المحسوسة تظهر أنه باستخدام تخزين الحرارة بالطريقة الكامنة يمكن الوصول إلى كثافات تخزين أعلى بمقدار يتراوح من 5 إلى 10 مرات ، كما أن حجم التخزين يمكن أن ينخفض إلى النصف إذا ما قورن بالحجم المطلوب من الماء. [15]

إن مادة (PCM) التي يجب أن تستخدم في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية يجب أن تتصف بالخصائص التالية: [14]

1) - الخصائص الفيزيو- حرارية Thermo-physical properties

- درجة حرارة التغير الطوري ضمن مجال درجات الحرارة العاملة المطلوب.
- قيمة عالية للحرارة الكامنة للإنصهار بواحدة الحجم وبالتالي حجم صغير للخزانات الحاوية لها.
- حرارة نوعية عالية لتأمين تخزين حراري محسوس جيد.
- إيصالية حرارية عالية للحالتين الصلبة و السائلة وذلك للمساعدة في شحن وتفريغ الطاقة في نظام التخزين .
- تغير صغير في الحجم عند حدوث التغير الطوري و ضغط تبخر منخفض عند درجات الحرارة العاملة وذلك لتخفيض مشاكل التخزين (الاحتواء).
- انصهار متجانس(Congruent melting) لمادة (PCM) عند سعة تخزين ثابتة للمادة وذلك خلال كل دورة حرارية .

2)- الخصائص الحركية Kinetic properties

- معدل ذري عالي (High nucleation) وذلك لتجنب التبريد الزائد في الطور السائل.
- معدل نمو بلوري عالي ، وبالتالي يمكن للنظام أن يلبي متطلبات استرجاع الحرارة من نظام التخزين .

3)- الخصائص الكيميائية Chemical properties

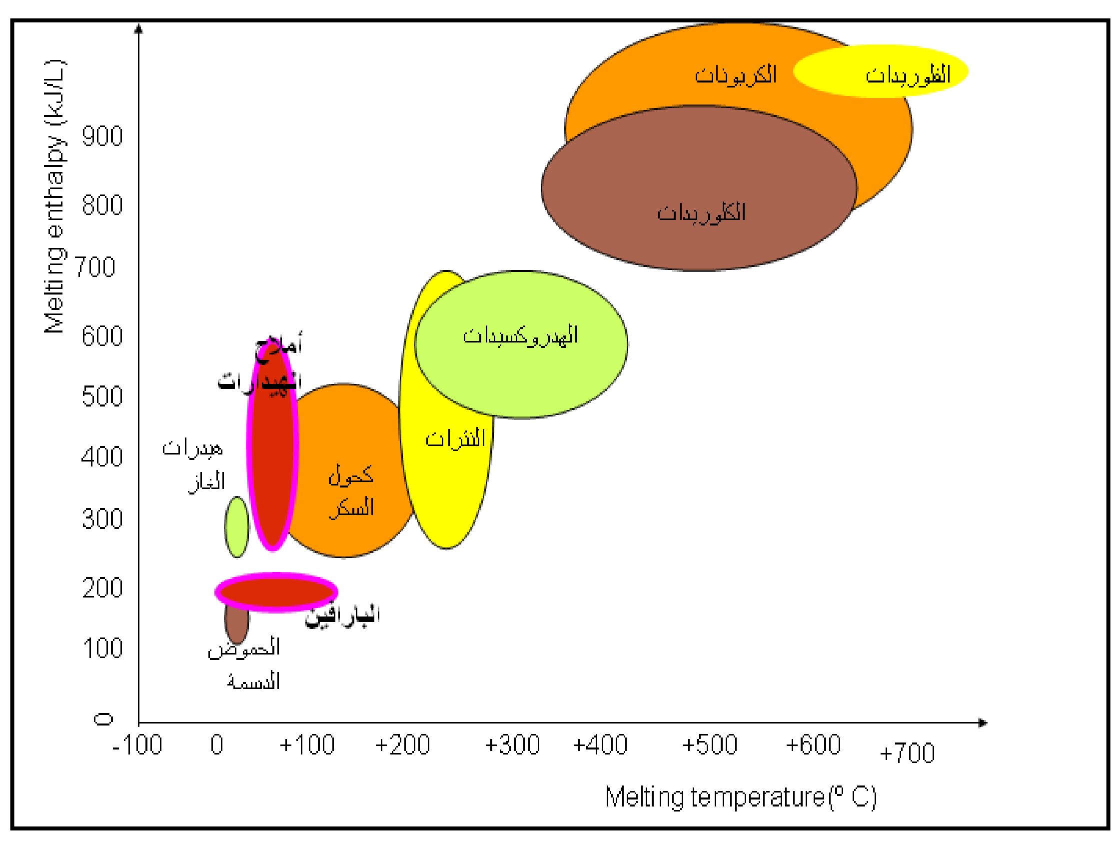
- الاستقرار الكيميائي.
- دورة حرارية (تجمد- انصهار) عكوسة بالكامل.
- لا يظهر أي انخفاض في الجودة أو أي تغير في خواصه بعد عدد كبير من الدورات الحرارية.

- لا يسبب الصدأ للمواد الحاوية له.
- غير سام ،غير قابل للاشتعال، آمن .

أكثر من ذلك يجب أن تكون المادة اقتصادية ومتوفرة في الأسواق على نطاق واسع.

2-3-1 تصنيف المواد ذات الطور المتغير Classification of (PCMs)

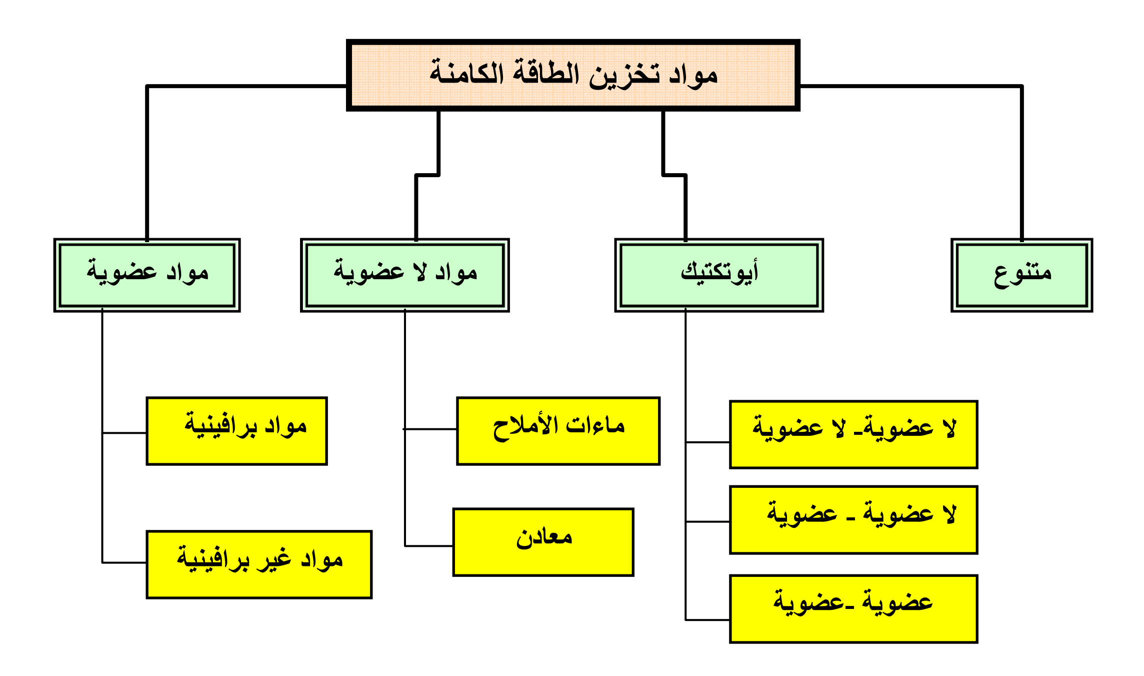
بشكل عام كافة المواد الموجودة في الطبيعة هي مواد متغيرة الطور ،يوضح الشكل رقم /2-1/ تصنيف مجموعات المواد الموجودة في الطبيعة تبعاً لدرجة حرارة الإنصهار و أنتالبي الإنصهار .



الشكل /2-1/ تصنيف المواد الموجودة في الطبيعة

لكن توجد مجموعة محددة من المواد تمتلك خواص حرارية و فيزيائية محددة هي المواد التي يطلق عليها المواد ذات الطور المتغير (PCM) وهي التي تستخدم في تخزين الطاقة الكامنة و يوضح الشكل رقم /2-2 / تصنيف هذه المواد .

يوجد عدد كبير من مواد (PCM) (عضوية ، لا عضوية، أيوتكتيك)، والتي يمكن تحديدها كمواد ذات طور متغير بالاعتماد على درجة حرارة الإنصهار والحرارة الكامنة للإنصهار. على كل حال، باستثناء نقطة الإنصهار ضمن مجال درجات الحرارة المطلوب ، فإن غالبية مواد (PCM) لا تلبي المواصفات المطلوبة التي تمت مناقشتها في الفقرة السابقة.



الشكل /2-2/ تصنيف مواد تخزين الطاقة الحرارية الكامنة

تقديم نماذج من المواد العضوية وغير العضوية في الجدولين /2-1/ و/2-2/ على الترتيب . و نظراً لعدم وجود مادة تتمتع بكافة المواصفات المطلوبة لتكون وسيط تخزين مثالي لتخزين الطاقة الحرارية ، فإنه يمكننا استخدام المواد المتوفرة والتي يمكن الحصول عليها و إجراء بعض التعديلات المناسبة في نظام التخزين لمحاولة التغلب على السلبيات التي يمكن أن تحدث نتيجة النقص في بعض المواصفات للمادة. يمكن أن نذكر على سبيل المثال :

- استخدام الزعانف المعدنية لزيادة الإيصالية الحرارية لمواد (PCM).
- أما مشكلة التبريد الزائد فيمكن معالجتها بتقديم مواد محفزة لمواد(PCM).
- و الإنصهار الغير متطابق(متجانس) يمكن منع حدوثه باستخدام السماكة المناسبة لمواد (PCM) .

تم في هذا البحث إجراء دراسة تفصيلية للسلوك الحراري و الكيميائي والخصائص المميزة لكل مجموعة من مواد(PCM) والتي تؤثر على تصميم أنظمة تخزين الحرارة بالطاقة الكامنة.

Table /1-2/ List of Organic PCMs. الجدول /1-2/ مواد PCMs العضوية

المادة	نقطة الانصهار (°C)	الحرارة الكامنة (kJ/ kg)	المادة	نقطة الانصهار (°C)	الحرارة الكامنة (kJ/ kg)
N-Tetradecane	5.5	226	N-Pentacosane	53.7	164
Formic acid	7.8	247	Myristic acid	54.0	199
N-Pentadecane	10.0	205	Oxolate	54.3	178
Acetic acid	16.7	273	Tristearin	54.5	191
N-Hexadecane	16.7	237	O-Xylene dichloride	55.0	121
Caprilone	40.0	260	β Chloroacetic acid	56.0	147
Docasyle bromide	40.0	201	N-Hexacosane	56.3	255
N-Henicosane	40.5	161	Nitro naphthalene	56.7	103
Phenol	41.0	120	α Chloroacetic acid	61.2	130
N-Lauric acid	43.0	183	N-Octacosane	61.4	134
P-Joluidine	43.3	167	Palmitic acid	61.8	164
Cynamide	44.0	209	Bees wax	61.8	177
N-Docosane	44.5	157	Glyolic acid	63.0	109
N-Tricosane	47.6	130	P-Bromophenol	63.5	86
Hydrocinnamic acid	48.0	118	Azobenzene	67.1	121
Cetyl alcohol	49.3	141	Acrylic Acid	68.0	115
O-Nitroaniline	50.0	93	Dintro toluene (2,4)	70.0	111
Camphene	50.0	239	Phenylacetic acid	76.7	102
Diphenyl amine	52.9	107	Thiosinamine	77.0	140
P-Dichlorobenzene	53.1	121	Benzylamine	78.0	174

Hale et al., 1971; Lane, 1983; Garg et al., 1985; Buddhi, 1994; Sharma, 1999; Gustafsson et al., 1998; Zalba et al., 2003; Farid et al., 2004.

Table /2-2/ List of Inorganic PCMs. الجدول /2-2/ مواد PCM اللاعضوية

المادة	نقطة الانصهار (°C)	الحرارة الكامنة (kJ/kg)	المادة	نقطة الانصهار (°C)	الحرارة الكامنة (kJ/kg)
H_2O	0.0	333	BI_3	31.8	10
$POCl_3$	1.0	85	$SO_3(\beta)$	32.3	151
D_2O	3.7	318	$TiBr_4$	38.2	23
$SbCl_5$	4.0	33	$H_4P_2O_6$	55.0	213
H_2SO_4	10.4	100	$SO_3\ (\gamma)$	62.1	331
$IC1\ (\beta)$	13.9	56	$SbCl_3$	73.4	25
MOF_6	17.0	50	$NaNO_3$	307	199
$SO3(\alpha)$	17.0	108	KNO_3	380	266
$IC1\ (\alpha)$	17.2	69	KOH	380	149
P_4O_6	23.7	64	$MgCl_2$	800	492
H_3PO_4	26.0	147	NaCl	802	492
Cs	28.3	15	Na_2CO_3	854	275
Ga	30.0	80	KF	857	452
$AsBr_3$	30.0	38	K_2CO_3	897	235
$SnBr_4$	30.0	28			

Lane, 1983; Abhat, 1983; Garg et al., 1985; Buddhi, 1994; Hale et al., 1971; Sharma, 1999.

2-3-1-1 البرافينات Paraffins

الصيغة الكيميائية العامة للبرافينات العادية هي **CnH2n+2** وهي من عائلة الهيدرو كربونات المشبعة و ذات مواصفات متشابهة جداً . البرافينات الواقعة بين المجال C5 إلى C15 هي برافينات سائلة.أما البرافينات الأعلى فهي شموع صلبة.

إن شمع البرافين هو أكثر المواد العضوية التجارية استخداماً في أنظمة تخزين الحرارة كمادة ذات طور متغير. وهي تتكون في الأساس من سلاسل هيدروكربونية ذات درجة حرارة انصهار تتراوح بين 23-67°C .

يستخلص شمع البرافين المتوفر على الصعيد التجاري من المشتقات النفطية عبر عمليات تقطير البترول و يكون بشكل مادة غير نقية , و لكنها تضم مجموعة مختلفة من الهيدروكربونات . و بشكل عام كلما ازداد طول السلسلة الهيدروكربونية كلما ازدادت درجة حرارة الإنصهار و الحرارة الكامنة للإنصهار . [20]

تم في الجدول /2-3 / عرض بعض خصائص الشموع البرافينية . والمتوفرة على نطاق واسع لدى العديد من المصنعين. و هي بشكل عام أغلى ثمناً من محاليل الأملاح.

***ايجابيات البرافينات:**

- لا تظهر الشموع البرافينية ميلاً نحو التحلل مع مرور الزمن و هي مواد مستقرة كيميائياً على الرغم من هذه الشموع تظهر بعض التأكسد و لو بدرجة منخفضة عند تعرضها للأوكسجين لفترة طويلة ، و لذلك فهي تحتاج لخزانات مغلقة . الباحث (Sharma t al 1998;1999;2002) [14] توصل في أبحاثه التي أجراها على ماركة تجارية من شمع البرافين إلى أن هذه المواد ذات خصائص مستقرة بعد 1500 دورة حرارة متعاقبة.
- لا تظهر الشموع البرافينية أي تغير في الخصائص الحرارية بعد عدد كبير من الدورات الحرارية(انصهار– تجمد) المتتالية.
- الشموع البرافينية لها حرارة كامنة للإنصهار عالية كما هو موضح في الجدول/2-3/ كما أنها لا تظهر ميلاً للتبريد الزائد وبالتالي لا حاجة لإضافة مواد محفزة .[14]
- إن الشموع البرافينية آمنة و خامدة كيميائياً،، وبالتالي هي متوافقة مع كل معادن الخزانات التي تحويها و تدمج بسهولة مع أنظمة تخزين الحرارة [14]

***مساوئ البرافينات:**

- للشموع البرافينية إيصالية حرارية منخفضة في حالتها الصلبة كما هو موضح في الجدول/4-2/ . وهذا يمثل مشكلة خصوصاً عند الحاجة لنقل لمعدلات نقل حرارة عالية خلال دورة التجمد.
- يحدث للشموع البرافينية تغير كبير في الحجم عند تغير حالتها الطورية . و هذا يسبب العديد من المشاكل عند تصميم الخزانات .
- البرافينات مواد قابلة للاشتعال ، و لكن يمكن تخفيف هذه المشكلة بسهولة باستخدام أوعية ملائمة لاحتواء هذه المواد .

Table /3-2/ Melting Point and Latent Heat of Fusion of Paraffins. الجدول/3-2/نقطة الانصهار و الحرارة الكامنة للانصهار للبرافينات

المادة	عدد ذرات الكربون	نقطة الانصهار (°C)	الكثافة (kg/m³)	الإيصالية الحرارية (W/mK)	الحرارة الكامنة (kJ/kg)
n - Dodecane	12	−12	750	0.21^S	n.a.
n - Tridecane	13	−6	756		n.a.
n - Tetradecane	14	4.5–5.6	771		231
n - Pentadecane	15	10	768	0.17	207
n - Hexadecane	16	18.2	774	0.21^S	238
n - Heptadecane	17	22	778		215
n - Octadecane	18	28.2	814^S[14], 775^L [14]	0.35^S [14], 0.149^L[14]	245
n - Nonadecane	19	31.9	912^S, 769^L	0.21^S	222
n - Eicosane	20	37			247
n - Heneicosane	21	41			215
n - Docosane	22	44			249
n - Tricosane	23	47			234
n - Tetracosane	24	51			255
n - Pentacosane	25	54			238
Paraffin wax	n.a.	32	785^S[15], 749^L[15]	0.514^S[15], 0.224^L[15]	251[15]
n - Hexacosane	26	56	770	0.21^S	257
n - Heptacosane	27	59	773		236
n - Octacosane	28	61	910^S, 765^L		255
n - Nonacosane	29	64			240
n - Triacontane	30	65			252
n - Hentriacontane	31	n.a.	930^S, 830^L		n.a.
n - Dotricontane	32	70			n.a.
n - Tritricontane	33	71			189

S: solid; L: liquid; n.a.: not available.

2-3-1-2 المواد غير البرافينية Non-Paraffins

إن المواد العضوية هي عبارة عن مجموعات فرعية من الحموض الدسمة و من المواد العضوية غير البرافينية . إن المواد العضوية غير البرافينية هي من أكثر مواد (PCM) عدداً و هي متنوعة كثيراً و مختلفة بخصائصها .فكل مادة من هذه المواد لها مواصفاتها الخاصة . على عكس المواد البرافينية التي لها خصائص متقاربة جداً . إن هذه المواد قابلة للاشتعال ولذلك يجب أن لا تتعرض لدرجات الحرارة العالية بشكل مفرط . تم جدولة المواد غير البرافينية في الجدول /2-4/ .

Table /4-2/ . Melting Point and Latent Heat of Fusion of Non - paraffins.

Name	Melting Point (°C)	Density (kg/m^3)	Latent Heat (kJ/ kg)
Formic acid	7.8	1226.7^{15C}	247
Acetic acid	16.7	1050^{20C}	187
Glyoerin	17.9	1260^{20C}	198.7
Lithium chloride ethanolate	21	n.a.	188
Polyethylene glycol 600	20–25	1100^{20C}	146
D – Lattic acid	26	1249^{15C}	184
1-3 Methyl pentacosane	29	n.a.	197
Camphenilone	39	n.a.	205
Docasyl bromide	40	n.a.	201
Caprylone	40	n.a.	259
Heptadecanone	41	n.a.	201
1-Cyclohexylooctadecane	41	n.a.	218
4-Heptadacanone	41	n.a.	197
Cyanamide	44	1080^{20C}	209
Methyl eicosanate	45	851^{79C}	230
3-Heptadecanone	48	n.a.	218
2-Heptadecanone	48	n.a.	218
Camphene	50	842^{54C}	238
9-Heptadecanone	51	n.a.	213
Methyl behenate	52	n.a.	234
Pentadecanoic acid	52.5	n.a.	178
Hypophosphoric acid	55	n.a.	213
Chloroacetic acid	56	1580^{20C}	130
Trimyristin	33–57	862^{20C}	201–213
Heptaudecanoic acid	60.6	n.a.	189
Bee wax	61.8	950	177
Glycolic acid	63	n.a.	109
Oxazoline wax-TS 970	74	n.a.	
Arachic acid	76.5	n.a.	227
Bromcamphor	77	1449^{81C}	174
Durene	79.3	838^{20C}	156
Acetamide	81	1159	241
Methyl brombrenzoate	81	n.a.	126
Alpha napthol	96	$1095^{98.7C}$	163
Glautaric acid	97.5	1429	156
p-Xylene dichloride	100	n.a.	138.7
Methyl Fumarate	102	1045	242
Catechol	104.3	1370^{15C}	207
Quinone	115	1318^{20C}	171
Acetanilide	115	1210^{4C}	142
Succinic anhydride	119	1104	204
Benzoic acid	121.7	1266^{15C}	142.8
Stibene	124	1164^{15C}	167
Benzamide	127.2	1341	169.4
Phenacetin	137	n.a.	136.7
Alpha glucose	141	1544	174
Acetyl – p- toluidene	146	n.a.	180
Phenylhdrazone benzaldehyide	155	n.a.	134.8
Salicylic acid	159	1443^{20C}	199
Benzanilide	161	n.a.	162
O-Mannitol	166	1489^{20C}	294
Hydroquinone	172.4	1358^{20C}	258
p-Aminobenzoic acid	187	n.a.	153

2-3-1-3 الحموض الدسمة Fatty Acids

تمتلك الحموض الدسمة الصيغة الكيميائية التالية CH3(CH2)2nCOOH ولها مواصفات قريبة من مواصفات البرافينات. ميزتها الإيجابية المتمثلة بالتحولات الطورية الحادة تعوض عن غلاء سعرها الذي يقدر بضعف إلى ثلاثة أضعاف سعر البرافينات .وهي مواد قابلة قليلاً للصدأ . الجدول /5-2/ يعطي بعض مواد الحموض الدسمة الملائمة لتطبيقات تخزين الطاقة الحرارية عند مجال درجات الحرارة المنخفضة . [21]

الجدول /5-2/ نقطة الانصهار و الحرارة الكامنة للانصهار للحموض الدسمة

Table /5-2/ Melting Point and Latent Heat of Fusion of Fatty Acids.

اسم المادة	نقطة الإنصهار (°C)	الكثافة (kg/m^3)	الإيصالية الحرارية (W/mK)	الحرارة الكامنة (kJ/kg)
Propyl palmiate	10	n.a.	n.a.	186
Isopropyl palmiate	11	n.a.	n.a.	100
Oleic acid	13.5–16.3	863^{60C}	n.a.	n.a.
Isopropyl stearate	14–19	n.a.	n.a.	140–142
Caprylic acid	16	901^{30C}	0.149^{39C}	148
	16.3	862^{80C} 981^{13C} 1033^{10C}	$0.145^{67.7C}$, 0.148^{20C}	149
Butyl stearate	19	n.a.	n.a.	140
				123–200
Dimethyl sabacate	21	n.a.	n.a.	120–135
Vinyl stearate	27–29	n.a.	n.a.	122
Methyl palmitate	29	n.a.	n.a.	205
Capric acid	32	878^{45C}	$0.153^{38.5C}$	152.7
	31.5	886^{40C}, 1004^{24C}	$0.152^{55.5C}$, 0.149^{40C}	153
Erucic acid	33	853^{70C}	n.a.	n.a.
Methyl-12-hydroxy-stearate	42–43	n.a.	n.a.	120–126
Lauric acid	42–44	862^{60C}, 1007^{24C}	n.a.	178
Elaidic acid	47	851^{79C}	n.a.	218
Pelargoinc acid	48	n.a.	n.a.	n.a.
Myristic acid	49–51	861^{55C}	n.a.	205
	54	844^{80C}		187
Palmitic acid	64	850^{65C}	$0.162^{68.4C}$	185.4
	61	847^{80C}	$0.159^{80.1C}$	203.4
Stearic acid	69	848^{70C}	0.172^{70C}	202.5
	60–61	965^{24C}		186.5
Valporic acid	120	n.a.	n.a.	n.a.

Lane, 1983; Abhat, 1983; Garg et al., 1985; Buddhi, 1994; Hale et al., 1971; Sharma, 1999.

2-3-1-4 ماءات الأملاح Salt Hydrates

تعتبر ماءات الأملاح من أقدم و أكثر المواد ذات الطور المتغير التي تمت دراستها لاستخدامها في أنظمة تخزين الطاقة الكامنة . وهي تتكون من الأملاح و الماء ، والتي تتحد مع بعضها بشكل قالب بلوري عندما تتصلب المادة .وهي يمكن أن تستخدم بمفردها أو بشكل مزيج أيوتكتيك .يعطي

الجدول /2-6/ مواصفات بعض هذه المركبات . إن هذه المواد متنوعة جداً و تتراوح نقطة انصهارها بين 15-137ºC . هذا وتعتبر ماءات الأملاح أكثر مجموعات مواد (PCM) أهمية ، وهي أكثر المواد التي درست لاستخدامها في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية بالطريقة الكامنة. [2]
يمكن تحديد ثلاثة نماذج من السلوك يمكن أن تسلكها الأملاح عند حدوث الانصهار وهي:
- انصهار متجانس(Congruent)
- انصهار غير متجانس(Incongruent)
- انصهار شبه متجانس(Semi-congruent)

يحدث الانصهار المتجانس عندما يكون الملح اللامائي منحلاً بالكامل بالماء عند درجة حرارة الانصهار . أما الانصهار الغير متجانس فيحدث عندما لا يكون الملح اللامائي منحلاً بالكامل بالماء عند درجة حرارة الانصهار. و الانصهار الشبه متجانس يحدث عندما يكون كل من الطور الصلب و الطور السائل بحالة توازن خلال التحول الانتقالي.

***ايجابيات ماءات الأملاح :**

- التكلفة المنخفضة و التوفر في الأسواق على نطاق واسع يجعل هذه المواد جذابة للاستخدام في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية.
- مقارنة مع مواد(PCM) الأخرى نلاحظ أن لماءات الأملاح نقطة انصهار حادة و إيصالية حرارية عالية . وهذا يزيد انتقال الحرارة من و إلى وحدة التخزين .
- لماءات الأملاح حرارة كامنة للإنصهار عالية ، مما يقلل من حجم التخزين المطلوب.
- أيضاً لا تظهر تغيراً كبيراً في الحجم عندما تغير حالتها الطورية (مقارنة مع مواد PCMالأخرى) مما يسهل تصميم الخزانات الملائمة لاحتواء هذه المواد .

***سلبيات ماءات الأملاح :**

- الانعزال (Segregation) حيث تميل بعض جزيئات الأملاح المائية أو اللامائية لأن تنعزل عن بعضها مما يقلل من الحجم الفعال المتوفر لتخزين الطاقة ، و تتم معالجة هذه المشكلة و تخفيض تأثيرها إلى حد كبير بجعل المزيج أكثر كثافة (gelled mixture)و ذلك على الرغم من أن ذلك يؤثر سلباً على خصائص تخزين الحرارة للمزيج .
- تعاني هذه المواد من مشكلة التبريد الزائد حيث أنها لا تبدأ بالتبلور عند نقطة التجمد بل عند درجة حرارة أخفض على عكس بقية مواد (PCM) الأخرى . وهذه المشكلة يمكن التغلب عليها بإضافة 3-4% من (Borax)كعامل تنوّي (Nucleating factor) وهي مادة تساعد على تشكل النوى (تشكل البلورات) في وسيط التخزين.

ملاحظة : كل مادة من ماءات الأملاح لها مادة خاصة بها تساعدها على التبلور عند نقطة التجمد المحددة.

- تسبب ماءات الأملاح الصدأ لمعدن الخزانات الحاوية لها . و لذلك يجب أولاً التحقـق مـن التوافق بين مواد PCM و مادة الخزانات التي ستحويها قبل الاستخدام. [2]

Table /6-2/ Melting point and latent heat of fusion of salt hydrates.

Name	Melting Point (°C)	Density (kg/m³)	Thermal Conductivity (W/m K)	Latent Heat (kJ/kg)	Melting Behavior[a] [13]
$LiClO_3.3H_2O$	8	n.a.	n.a.	253	c
$NH_4Cl.Na_2SO_4.10H_2O$	11	n.a.	n.a.	163	n.a.
$K_2HO_4.6H_2O$	14	n.a.	n.a.	108	c
$NaCl.Na_2SO_4.10H_2O$	18	n.a.	n.a.	286	n.a.
$KF.4H_2O$	18	n.a.	n.a.	330	c
$K_2HO_4.4H_2O$	18.5	1447^{20C}, 1455^{18C}, 1480^{6C}	n.a.	231	n.a.
$Mn(NO_3)_2.6H_2O$	25 25.8	1738^{20C}[12], 1728^{40C}[12], 1795^{5C}[12]	n.a.	148 125.9[12]	n.a.
$LiBO_2.8H_2O$	25.7	n.a.	n.a.	289	n.a.
$FeBr_3.6H_2O$	27	n.a.	n.a.	105	n.a.
$CaCl_2.6H_2O$	29–30	1562^{32C}, 1802^{24C}	$0.561^{61.2C}$, 1.008^{23C}	170–192	ic
$LiNO_3.3H_2O$	30	n.a.	n.a.	189–296	c
$Na_2SO_4.10H_2O$	32	1485^{24C}	0.544	251–254	ic
$Na_2CO_3.10H_2O$	33–36	1442	n.a.	247	ic
$KFe(SO_4)_2.12H_2O$	33	n.a.	n.a.	173	ic
$CaBr_2.6H_2O$	34	1956^{35C}, 2194^{24C}	n.a.	115–138	n.a.
$LiBr.2H_2O$	34	n.a.	n.a.	124	ic
$Na_2HPO_4.12H_2O$	35	1522	n.a.	256–281	ic
$Zn(NO_3)_2.6H_2O$	36	1828^{36C}, 1937^{24C}, 2065^{14C}	$0.464^{39.9C}$, $0.469^{61.2C}$	134–147	c
$Mn(NO_3)_2.4H_2O$	37	n.a.	n.a.	115	n.a.
$FeCl_3.6H_2O$	37	n.a.	n.a.	223	c
$CaCl_2.4H_2O$	39	n.a.	n.a.	158	ic
$CoSO_4.7H_2O$	40.7	n.a.	n.a.	170	n.a.
$CuSO_4.7H_2O$	40.7	n.a.	n.a.	171	n.a.
$KF.2H_2O$	42	n.a.	n.a.	162–266	c
$MgI_2.8H_2O$	42	n.a.	n.a.	133	n.a.
$CaI_2.6H_2O$	42	n.a.	n.a.	162	n.a.
$Ca(NO_3)_2.4H_2O$	43–47	n.a.	n.a.	106–140	c
$Zn(NO_3)_2.4H_2O$	45	n.a.	n.a.	110	n.a.
$K_3PO_4.7H_2O$	45	n.a.	n.a.	145	n.a.
$Fe(NO_3)_3.9H_2O$	47	n.a.	n.a.	155–190	ic
$Mg(NO_3)_3.4H_2O$	47	n.a.	n.a.	142	n.a.
$Na_2SiO_3.5H_2O$	48	n.a.	n.a.	168	n.a.
$Na_2HPO_4.7H_2O$	48	n.a.	n.a.	135–170	ic
$Na_2S_2O_3.5H_2O$	48	1600	n.a.	209	n.a.
$K_2HPO_4.3H_2O$	48	n.a.	n.a.	99	n.a.
$MgSO_4.7H_2O$	48.4	n.a.	n.a.	202	n.a.
$Ca(NO_3)_2.3H_2O$	51	n.a.	n.a.	104	n.a.
$Na(NO_3)_2.6H_2O$	53	n.a.	n.a.	158	n.a.
$Zn(NO_3)_2.2H_2O$	55	n.a.	n.a.	68	c
$FeCl_3.2H_2O$	56	n.a.	n.a.	90	n.a.
$CO(NO_3)_2.6H_2O$	57	n.a.	n.a.	115	n.a.
$Ni(NO_3)_2.6H_2O$	57	n.a.	n.a.	168	n.a.
$MnCl_2.4H_2O$	58	n.a.	n.a.	151	n.a.

تابع الجدول /2-6/

Name	Melting Point (°C)	Density (kg/m^3)	Thermal Conductivity (W/m K)	Latent Heat (kJ/kg)	Melting Behavior[a] [13]
$CH_3COONa.3H_2O$	58	n.a.	n.a.	270–290	ic
$LiC_2H_3O_2.2H_2O$	58	n.a.	n.a.	251–377	n.a.
$MgCl_2.4H_2O$	58.0	n.a.	n.a.	178	n.a.
$NaOH.H_2O$	58	n.a.	n.a.	272	n.a.
$Na(CH_3COO).3H_2O$	58	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$Cd(NO_3)_2.4H_2O$	59	n.a.	n.a.	98	n.a.
$Cd(NO_3)_2.1H_2O$	59.5	n.a.	n.a.	107	n.a.
$Fe(NO_3)_2.6H_2O$	60	n.a.	n.a.	125	n.a.
$NaAl(SO_4)_2.12H_2O$	61	n.a.	n.a.	181	ic
$FeSO_4.7H_2O$	64	n.a.	n.a.	200	n.a.
$Na_3PO_4.12H_2O$	65	n.a.	n.a.	168	n.a.
$Na_2B_4O_7.10H_2O$	68	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$Na_3PO_4.12H_20$	69	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$LiCH_3COO.2H_2O$	70	n.a.	n.a.	150–251	c
$Na_2P_2O_7.10H_2O$	70	n.a.	n.a.	186–230	ic
$Al(NO_3)_2.9H_2O$	72	n.a.	n.a.	155–176	ic
$Ba(OH)_2.8H_2O$	78	1937^{84C}, 2070^{24C}, 2180	$0.653^{85.7C}$, $0.678^{98.2C}$, 1.255^{23C}	265–280	c
$Al_2(SO_4)_3.18H_2O$	88	n.a.	n.a.	218	ic
$Sr(OH)_2.8H_2O$	89	n.a.	n.a.	370	ic
$Mg(NO_3)_2.6H_2O$	89–90	1550^{94C}, 1636^{25C}	0.490^{95C}, 0.502^{110C}, 0.611^{37C}, $0.669^{55.6C}$	162–167	c
$KAl(SO_4)_2.12H_2O$	91	n.a.	n.a.	184	n.a.
$(NH_4)Al(SO_4).6H_2O$	95	n.a.	n.a.	269	n.a.
$Na_2S.51/2H_2O$	97.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$LiCl.H_2O$	99	n.a.	n.a.	212	ic
$CaBr_2.4H_20$	110	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$Al_2(SO_4)_2.16H_2O$	112	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$MgCl_2.6H_2O$	115–117	1450^{120C}, 1442^{78C}, 1569^{20C}, 1570^{20C}	0.570^{120C}, 0.598^{140C}, 0.694^{90C}, 0.704^{110C}	165–169	n.a.
$NaC_2H_3O_2.3H_2O$	137	1450	n.a.	172	n.a.

n.a.: not available; c: congruent melting; ic: incongruent melting.

2-3-1-5 الأيوتكتيك Eutectics

الأيوتكتيك هو عبارة عن مركب مكون من مادتين أو أكثر، كل مادة تكون قابلة للمزج في الأخرى بشكل متجانس ، وتشكلان معاً مزيجاً من المكونات البلورية خلال عملية التبلور (Lane,1989). مركبات الأيوتكتيك عادة ما تنصهر و تتصلب بدون حدوث ظاهرة الانعزال

(Segregation) كون البلورات تتجمد بشكل متجانس وبنفس الوقت ، بحيــث لا تتــرك مجــالاً لانفصال أي بلورات .و كذلك الأمر خلال الإنصهار ، فكلا المكونين ينصهران بنفس الوقت .
يعطي الجدول /2-7 / قائمة بالمركبات الأيوتكتيكية المطورة . [7]

Table /7-2/ List of Organic and Inorganic Eutectics. الجدول- /2-7/ المركبات الأيوتكتيكية العضوية

اسم المركب	التركيب (wt %)	نقطة الانصهار (°C)	الحرارة الكامنة (kJ/ kg)
$Na_2SO_4+NaCl+KCl+H_2O$	31+13+16+40	4	234
$Na_2SO_4+NaCl+NH_4Cl+H_2O$	32+14+12+42	11	n.a.
$C_5H_5C_6H_5+(C_6H_5)_2O$	26.5+73.5	12	97.9
$Na_2SO_4+NaCl+H_2O$	37+17+46	18	286
$Na_2S_4+MgSO_4+H_2O$	25+21+54	24	n.a.
$C_{14}H_{28}O_2+C_{10}H_{20}O_2$	34+66	24	147.7
$Ca(NO)_3.4H_2O+Mg(NO)_3.6H_2O$	47+53	30	136
$NH_2CONH_2+NH_4NO_3$	–	46	95
$Mg(NO_3)_2.6H_2O+NH_4NO_3$	61.5+38.4	52	125.5
$Mg(NO_3)_2.6H_2O+MgCl_2.6H_2O$	58.7+41.3	59	132.2
$Mg(NO_3)_2.6H_2O+Al(NO_3)_2.9H_2O$	53+47	61	148
$Mg(NO_3)_2.6H_2O+MgBr_2.6H_2O$	59+41	66	168
Napthalene + Benzoic Acid	67.1+32.9	67	123.4
$AlCl_3+NaCl+ZrCl_2$	79+17+4	68	234
$AlCl_3+NaCl+KCl$	66+20+14	70	209
$NH_2CONH_2+NH_4Br$	66.6+33.4	76	151
$LiNO_3+NH_4NO_3+NaNO_3$	25+65+10	80.5	113
$AlCl_3+NaCl+KCl$	60+26+14	93	213
$AlCl_3+NaCl$	66+34	93	201
$NaNO_2+NaNO_3+KNO_3$	40+7+53	142	n.a.

n.a.: not available.
Lane, 1983; Abhat, 1983; Garg et al., 1985; Buddhi, 1994; Hale et al., 1971; Sharma, 1999.

6-1-3-2 مواد PCMالتجارية:

تقوم العديد من الشركات مثل:
Climator, Cristopia , ESP Ltd , Mitsubishi Chemical Corporation, Rubitherm GmbH TEAP and Witco, PCM-Energy)
بتطوير المواد ذات الطور المتغير لاستخدامها في التطبيقات المختلفة . وقد تمت محاولة جمع مواد PCM التجارية والشركات التي تقوم بتصنيعها و تطويرها .و قد تم اختيار المواد العاملــة ضــمن مجال درجات الحرارة 0-118°C . [24]
و تم تصنيفها في الجدول /9 /.

Table 9 List of Commercially Available PCMs (0 °C–118 °C).

Name	Melting Point (°C)	Latent Heat (kJ/kg)	Density (kg/m^3)	Manufacturer
TH 0	0	334	n.a.	TEAP (www.teappcm.com)
A 4	4	227	766	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
Witco 85010-1	4	129.6	n.a.	Witco
RT 2	6	156	860	Rubitherm (www.rubitherm.com)
TH 7	7	189	n.a.	TEAP (www.teappcm.com)
RT 5	7	156	860	Rubitherm (www.rubitherm.com)
E 7	7	120	1540	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
C 7	7	162	1420	Climator (www.climator.com)
RT 6	8	174	860	Rubitherm (www.rubitherm.com)
E 8	8	140	1470	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
A 8	8	220	770	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
E 10	10	140	1520	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
E 13	13	140	1780	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
C 15	15	130	n.a.	Climator (www.climator.com)
E 21	21	150	1480	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
RT 20	22	172	870	Rubitherm (www.rubitherm.com)
A 22	22	220	770	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
C 24	24	216	1480	Climator (www.climator.com)
RT 26	25	131	880	Rubitherm (www.rubitherm.com)
TH 25	25	159	n.a.	TEAP (www.teappcm.com)
Witco 45 A	26.3	167.2	n.a.	Witco
S 27	27	207	1470	Cristopia (www.cristopia.com)
STL 27	27	213	1090	Mitsubishi Chemical
RT 27	28	179	870	Rubitherm (www.rubitherm.com)
GR 27	28	72	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
PX 27	28	112	640	Rubitherm (www.rubitherm.com)
A 28	28	245	790	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
TH 29	29	188	1540	TEAP (www.teappcm.com)
E 30	30	201	1300	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
C 32	32	302	1450	Climator (www.climator.com)
E 32	32	186	1460	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
RT 35	35	157	880	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 42	43	174	880	Rubitherm (www.rubitherm.com)
GR 41	43	63	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
FB 41	43	117	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 41	43	152	880	Rubitherm (www.rubitherm.com)
STL 47	47	221	1340	Mitsubishi Chemical
E 48	48	201	1670	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
C 48	48	324	1360	Climator (www.climator.com)
STL 52	52	201	1300	Mitsubishi Chemical
PX 52	53	103	640	Rubitherm (www.rubitherm.com)
STL 55	55	242	1290	Mitsubishi Chemical
FB 54	55	135	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 54	55	179	900	Rubitherm (www.rubitherm.com)
E 58	58	226	1280	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
C 58	58	364	1460	Climator (www.climator.com)
TH 58	58	226	1290	TEAP (www.teappcm.com)
RT 65	64	173	910	Rubitherm (www.rubitherm.com)
C 70	70	194	1700	Climator (www.climator.com)
PX 80	77	91	640	Rubitherm (www.rubitherm.com)
GR 80	79	71	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
FB 80	79	132	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 80	79	175	920	Rubitherm (www.rubitherm.com)

Table 9 Continued

Name	Melting Point (°C)	Latent Heat (kJ/kg)	Density (kg/m^3)	Manufacturer
PCM 80	80	231	n.a.	Mitsubishi Chemical
PCM 86	86	246	n.a.	Mitsubishi Chemical
E 89	89	163	n.a.	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
TH 89	89	149	n.a.	TEAP (www.teappcm.com)
RT 90	90	194	930	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 100	99	168	940	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 112	112	213	n.a.	Rubitherm (www.rubitherm.com)
E 117	117	169	1450	EPS Ltd. (www.epsltd.co.uk)
?	118	339.8	1480	Mitsubishi Chemical

الفصل الثالث

أنظمة تخزين الطاقة الكامنة

Latent Heat Storage Systems

أنظمة تخزين الطاقة الكامنة

3-1 مقدمة

إن الطبيعة المتقطعة للأشعة الشمسية و الحاجة إلى الاستفادة من أنظمة الطاقة الشمسية بشكل مستمر و متواصل و بحمولة ثابتة يجعل من أنظمة التخزين أمراً أساسيا وحيوياً في معظم التطبيقات المحتملة للطاقة الشمسية.

يمكن استخدام مواد PCMs في أنظمة تخزين الطاقة الشمسية المختلفة مثل :

- أنظمة تأمين الماء الصحي الساخن.
- تدفئة البيوت البلاستيكية الزراعية.
- التدفئة و التكييف.
- الطباخات الشمسية.
- أنظمة استرجاع الحرارة المفقودة.
- من التطبيقات الحديثة و الواعدة جداً لهذه المواد :

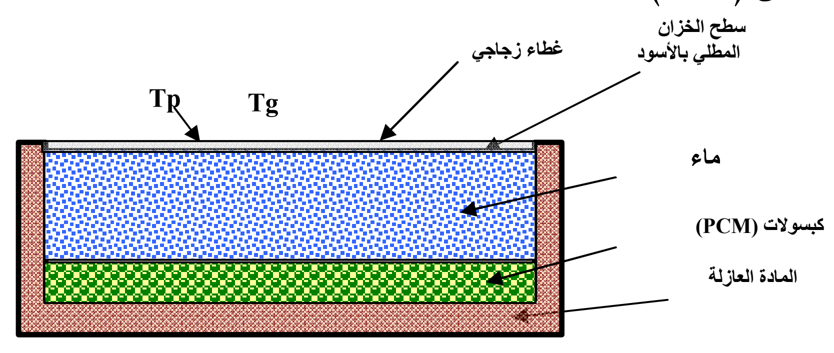
-دمج هذه المواد في هياكل الأبنية لاستخدامها في الإدارة الطاقية للأبنية .

تم تصنيف هذه التطبيقات مع عرض بعض النماذج البحثية والتجارب التي أجراها الباحثين الذين سبقونا في هذا المجال و النتائج التي توصلوا لها .

3-2 سخانات الماء الشمسية Solar Water Heater

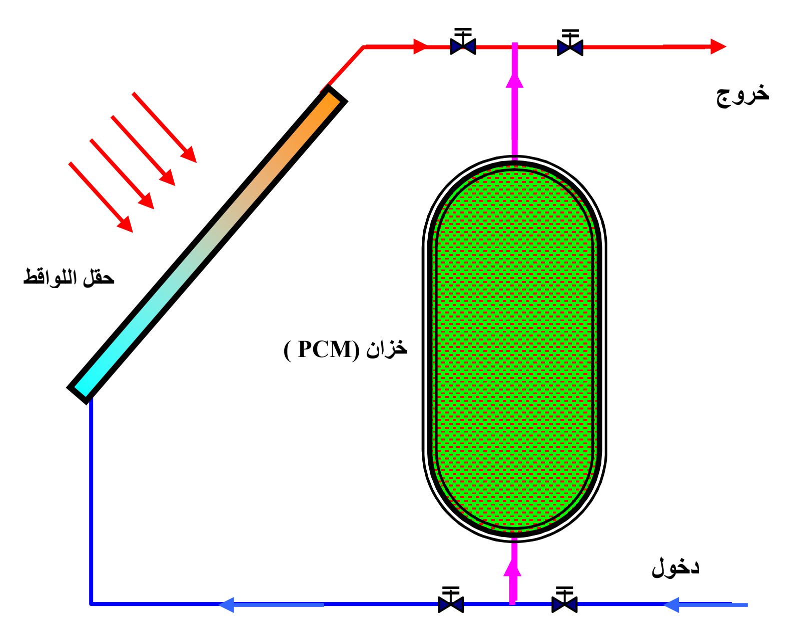
انتشرت سخانات الماء الشمسية بشكل واسع نظراً لرخص ثمنها و بساطة تصميمها و صيانتها.

-الباحث Prakesh et al,1985 قام بدراسة و تحليل نموذج من السخانات الشمسية و المسمى باللاقط ذو الخزان وهو يحوي بداخله على طبقة من مواد (PCM) متوضعة أسفل اللاقط الشكل/3-1/. خلال ساعات شروق الشمس يسخن الماء و بدوره ينقل الحرارة إلى مادة (PCM) في أسفل السخان . مادة (PCM) تتصهر و تخزن الطاقة الحرارية على شكل طاقة كامنة وخلال الفترات التي لا يتوفر فيها إشعاع شمسي يتم سحب الماء الساخن ويستبدل بماء بارد، الذي بدوره يكتسب الطاقة من (PCM) .



الشكل /3-1/ السخان ذو خزان (PCM)

–قام الباحثين Bansal و Buddhi قاما بإجراء دراسة تحليلية لنظام طاقة شمسية لتأمين الماء الساخن الصحي ذو خزان اسطواني لتخزين الطاقة الكامنة الشكل/2-3 /

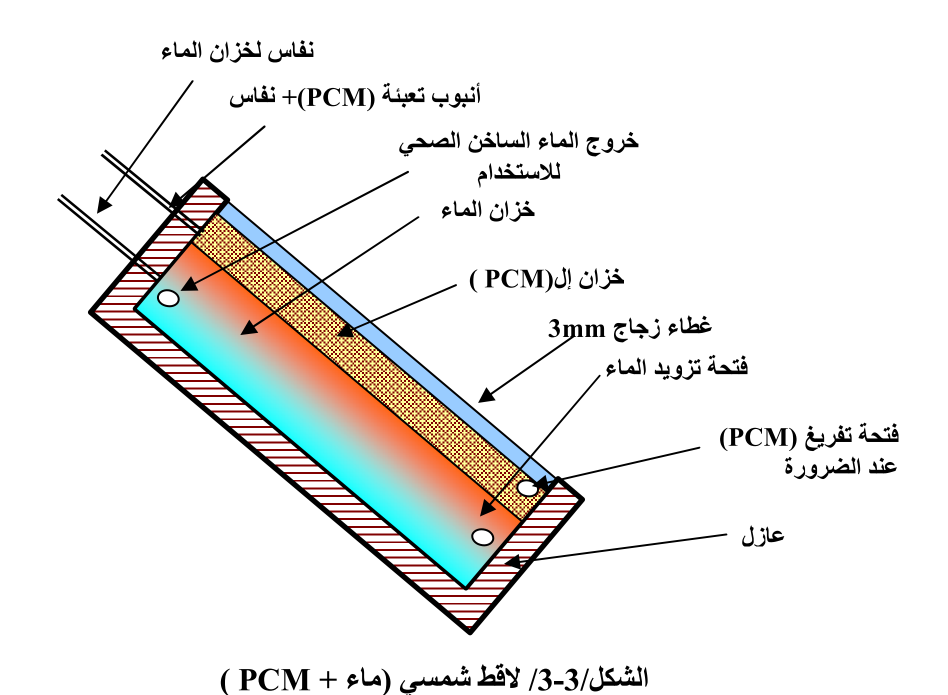


الشكل/3-2/ نظام ماء ساخن صحي بوحدة تخزين حرارة كامنة منفصلة

طريقة عمل نظام التخزين هذا على النحو التالي :

يتم شحن مواد (PCM) الموجودة في الخزان الأسطواني ضمن كبسولات بالطاقة الحرارية من الشمس عبر دارة مغلقة تستخلص الحرارة من حقل اللواقط وتنقله إلى الخزان . خلال طور التفريغ يمرر الماء إلى وحدة التخزين فيستخلص الطاقة الحرارية ثم إلى الاستخدام . و بالنتيجة قام الباحثان بتطوير النموذج النظري لنظام تخزين الحرارة الكامنة هذا . كما قاما بإجراء الحسابات اللازمة و درسا السلوك الحراري داخل الخزان و قد استخدما كل من شمع البرافين (P-116) و أحد الأحماض الدسمة (Stearic acid) كمواد ذات طور متغير و أجريا مقارنة بينهما .

– الباحث Kurklu et al.(2002) صمم و طور و قيم الأداء الحراري لنموذج جديد من اللواقط الشمسية (ماء+PCM). هذا اللاقط مكون من قسمين مرتبطين مع بعضهما البعض الأول مملوء بالماء و الثاني مملوء بشمع البرافين(نقطة الانصهار 50°C) كمادة ذات طور متغير الشكل /3-3/، و قد أشارت نتائج هذه الدراسة إلى أن درجة حرارة الماء ارتفعت إلى (55°C) خلال يوم عادي كانت شدة الإشعاع الشمسي فيه عادية ، كما حافظ الماء على درجة حرارة أعلى من (30°C) خلال الليل . إن للاقط الشمسي هذا (ماء+PCM) عدة مزايا مقارنة مع اللواقط المسطحة التقليدية خصوصاً من ناحية الوزن الكلي للنظام و التكلفة و فعالية تخزين الطاقة . [26]



الشكل/3-3/ لاقط شمسي (ماء + PCM)

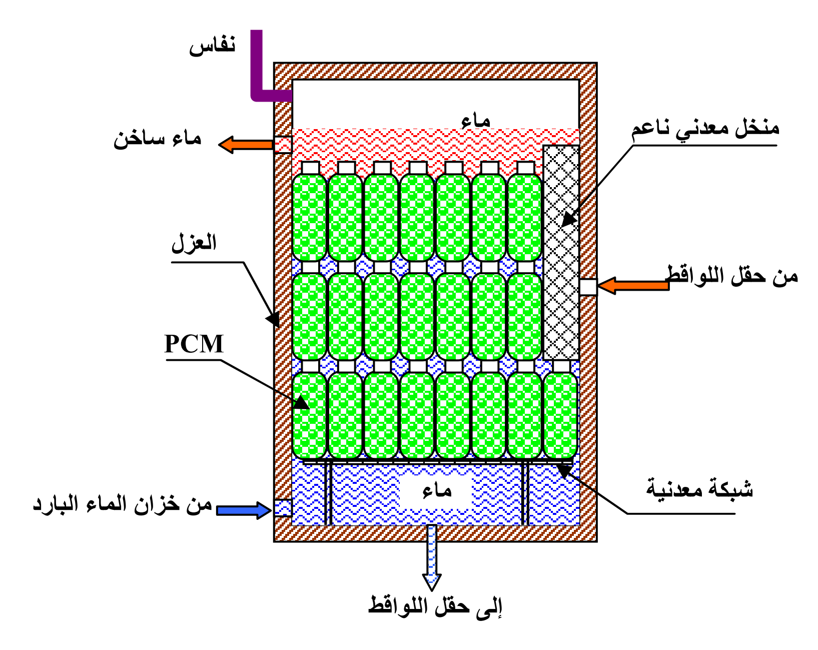
– مؤخراً أجرى الباحث Canbazoglu et al.(2004) بحثاً هاماً و قيماً حيث أجرى مقارنة بين أنظمة سخانات الماء الشمسية التقليدية وأنظمة سخانات الماء الشمسية التي تحوي مواد (PCM) الشكل /3-4/ يمثل مقطعاً عرضياً لخزان الطاقة الحاوي على (PCM).

تم ملء عبوات من البولي إيتيلين بمادة (PCM) و رتبت في الخزان في ثلاثة صفوف . الكمية الإجمالية من (PCM) التي استخدمت في الخزان كانت حوالي 180Kg ، كثافة الطور الصلب لهذه المادة كانت $1666Kg/m^3$. لقد تم ترتيب العبوات بحيث لا تسمح للماء بالجريان بشكل أفقي نظراً لقربها من بعضها البعض . و بالتالي فالماء سوف يجري فقط ضمن الفراغات الشاقولية بين العبوات في خزان الطاقة الحرارية .

وقد أشارت نتائج الاختبارات (خلال شهر تشرين الثاني) إلى أن درجة حرارة الماء حافظت على قيمة ثابتة (46°C) طيلة الليل حتى شروق الشمس. كما أن متوسط فرق درجات الحرارة بين منتصف خزان الطاقة الحرارية و مخرج حقل اللواقط في النظام الحاوي على مواد (PCM) أكبر منه في النظام التقليدي بحوالي 6°C ، و تعتبر هذه القيمة قيمة معتبرة في أنظمة الطاقة الشمسية و تعبر عن الأداء العالي لتخزين الطاقة الحرارية للنظام الحاوي على (PCM).

إن التكلفة الإضافية المترتبة على استخدام مواد (PCM) هي حوالي 0.5$ لكل 1 ليتر من حجم خزان الطاقة الحرارية . و على كل حال ، فإن حجم خزان الماء الساخن المطلوب لتخزين نفس الحرارة في أنظمة تخزين الطاقة التي تحوي مواد (PCM) سوف يكون أصغر من حجم خزانات

الماء الساخن المستخدمة في أنظمة الطاقة الشمسية التقليدية بحدود النصف تقريباً . و لـذلك ,فمـن الواضح أن استخدام مواد (PCM)في النظام لن يترتب عليه أي زيادة مهمة في التكلفة . [27]



الشكل /3-4/مقطع عرضي في خزان اسطواني لتخزين الطاقة الحرارية باستخدام مواد (PCM)

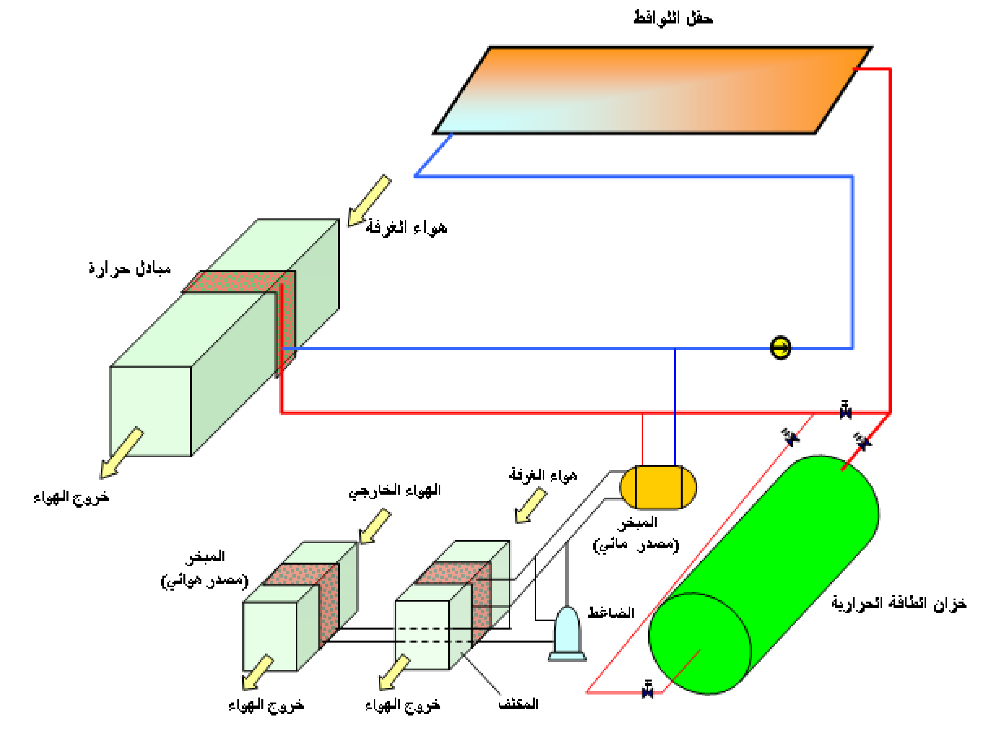
3-3 تدفئة الأبنية Space Heating

قام الباحثان Jurinak و Khalik في عام 1987-1988 بدراسة تأثير مواد (PCMs) على أداء أنظمة الطاقة الشمسية الهوائية و كانت النتيجة الرئيسية هي أنه يجب اختيار المـادة المناسـبة مـن المواد ذات الطور المتغير بالاعتماد على درجة حرارة التغير الطوري للمادة أكثر من الاعتماد على الحرارة الكامنة . بمعنى أن لدرجة حرارة الإنصهار تأثير هام على أداء النظام . كما توصلوا إلـى أن الأنظمة التي تستخدم Na2SO4.10H2O تحتاج تقريباً إلى حجم يساوي نصف حجم التخـزين لنظام خزان ماء تقليدي [20] . كما تم تقييم السعة الحرارية الفعالة لوحدة تخزين الطاقـة الكامنـة كتابع لكل من :كتلتها ، الحرارة الكامنة، الحرارية النوعية ،درجة حرارة الإنصـهار . إن السـعة الحرارية الفعالة المكتسبة يمكن أن تستخدم لتقييم الأداء الحراري للنظـام الـذي يستخدم مـواد (PCM).

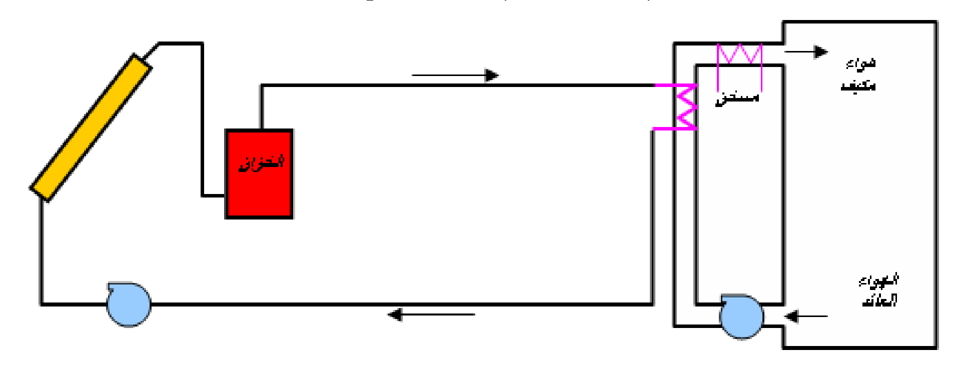
– أيضاً قام الباحث Kaygusuz et al.(1995a) باختبار أداء نظام مضخة حراريـة ذات تصـميم يعتمد على مصدري طاقة تستخدم لتدفئة الأبنية الشكل/3-5/. في هذا النظام تم تصميم المبخر بحيث يتلقى الطاقة إما من الجو الخارجي أو من خزان الطاقة الشمسية .

- أيضاً الباحث Kaygusuz et al.(1995b) نفذ دراسة تجريبية و نظرية لتحديد أداء خزانات الطاقة الكامنة المستخدمة في أنظمة تأمين الماء الساخن بالطاقة الشمسية كما درس التغيرات التي تطرأ على درجة حرارة خروج الماء من خزان الطاقة وذلك عند اعتماد مقادير مختلفة لعدد الوحدات الناقلة في وحدة التخزين. ويتكون هذا النظام من حقل اللواقط ، خزان الطاقة الكامنة، مبادل حراري (ماء إلى الهواء) ، سخان كهربائي مساعد ،مضخة تدوير، تجهيزات تحكم و مراقبة الشكل/3-6 /

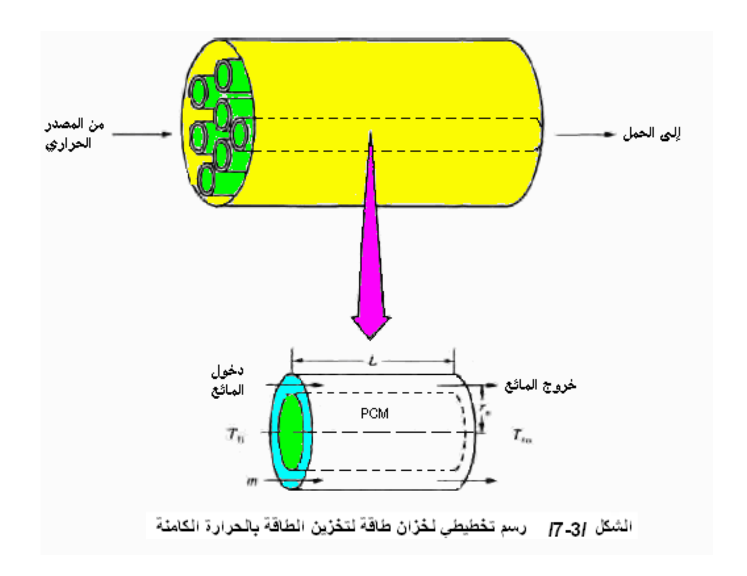
مبدأ عمل النظام : عند توفر الطاقة الشمسية يتم جمعها و نقلها إلى خزان الطاقة المملوء بحوالي (1500Kg) من كبسولات (PCM)، ويقوم الوسيط الناقل للحرارة (الماء) بالجريان بشكل حر داخل الخزان كما هو موضح في الشكل/3-7/ .



الشكل/3-5/ نظام مضخة حرارية مدعم بالطاقة الشمسية مع خزان طاقة كامنة



الشكل /3-6/رسم تخطيطي لنظام تكييف بالطاقة الشمسية



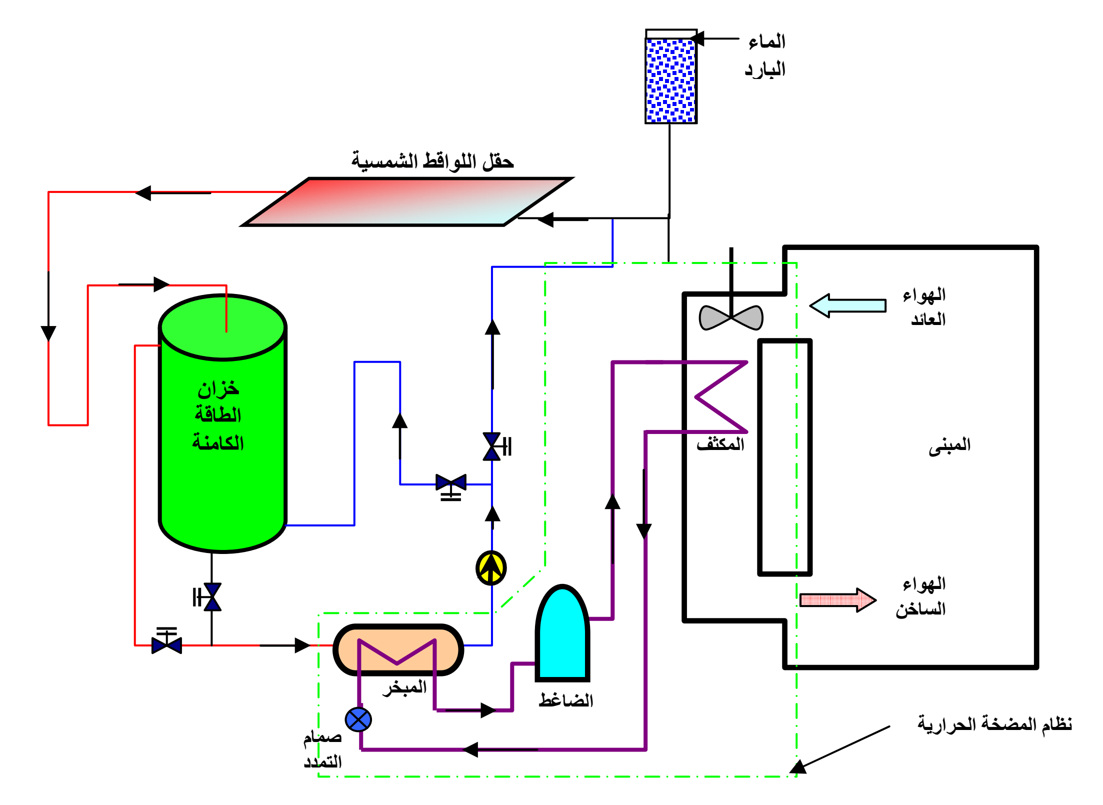
الشكل /3-7/ رسم تخطيطي لخزان طاقة لتخزين الطاقة بالحرارة الكامنة

من الدراسة النظرية و البحث التجريبي تم التوصل إلى أن لتخزين الطاقة الحرارية بالطاقة الكامنة دوراً في غاية الأهمية في تعديل الشروط المناخية . و لذلك يمكن استخدام ماءات الأملاح مثل Na2SO4.10H2O و CaCl2.6H2O كمواد ذات طور متغير لتخزين الطاقة الحرارية و سوف تؤمن هذا الخزانات بديلاً معتبراً عن الخزانات الحصوية و المائية .

إن مواد (PCM) هي المفضلة كمصدر حراري بدلاً عن الماء و الحصى في نظام المضخة الحرارية كون درجة حرارة تخزين الطاقة لمواد (PCM) المستخدمة حوالي 25-35°C سواءً كانت المادة Na2SO4.10H2O أو CaCl2.6H2O و مجال درجات الحرارة هذا مناسب لتطبيقات المضخة الحرارية المدعمة بالطاقة الشمسية . [24]

– قيم الباحث Mehmed(2000) الأداء الحراري لخزان اسطواني لتخزين الطاقة الحرارية مرتبط مع مضخة حرارية شمسية تستخدم لتدفئة بناء . وقد تم تصميم هذا النظام لتدفئة مبنى بمساحة $75m^2$ الشكل/3-8/. وتم وصل خزان الطاقة الكامنة إلى حقل لواقط شمسية بمساحة $30m^2$.كما تم تثبيت الخزان الأسطواني بشكل شاقولي وتعبئته بحوالي 1090Kg من كبسولات (CaCl2.6H2O) متوضعة ضمن أنابيب اسطوانية داخل الخزان .

مبدأ عمل النظام : خلال طور الشحن يقوم الوسيط الناقل للحرارة (الماء) بنقل الطاقة الحرارية من حقل اللواقط إلى الخزان ، تقوم مواد (PCM) بتخزين الطاقة المكتسبة على شكل طاقة كامنة .تستخدم الطاقة المخزنة كمصدر حراري لمبخر المضخة الحرارية . و أخيراً يرسل الماء إلى حقل اللواقط من جديد . وعندما تنخفض شدة الإشعاع الشمسي أو خلال الليل يحول الماء مباشرة إلى خزان (PCM) بدلاً من إرساله إلى حقل اللواقط حيث يقوم الماء البارد باستخلاص الحرارة من (PCM) في الخزان ثم إلى المبخر من جديد .



الشكل /3-8/ نظام مضخة حرارية مدعمة بنظام طاقة شمسية ذو خزان طاقة كامنة

وبالنتيجة خلال الليل أو في الأوقات الغائمة تستخدم الطاقة المخزنة قي الخزان كمصدر حراري للمضخة الحرارية . وعندما تتوفر شدة إشعاع شمسي كافية و تكون حمولة المبنى صفر(نظام المضخة الحرارية لا يعمل) يتم تدوير الماء بين حقل اللواقط و الخزان لشحن وتخزين الطاقة. و قد نصح الباحث أنه كلما كانت أنابيب الشبكة أقصر و أقل سماكة كلما حصلنا على فعالية أفضل لعمل النظام .

3-4 تكييف المباني Space Cooling

إن أكثر وسائط تخزين البرودة والمستخدمة لتكييف المباني هي الماء ، الثلج، مواد (PCM) و أهمها المواد الشائعة المعروفة بأيوتكتيك الأملاح .

لقد تم استخدام الثلج لتخزين البرودة لسنوات عديدة ، وقد تم تطوير العديد من التقنيات لتخزين الثلج ومن التقنيات التي تم إتباعها للتطبيقات المنخفضة درجة الحرارة : أنظمة تخزين الجليد المجمع ، أنظمة تخزين (ice-on-coil) ذات الإنصهار الخارجي ، أنظمة تخزين (ice-on-coil) ذات الانصهار الداخلي ،كبسولات الجليد . وبشكل طبيعي أنظمة تخزين (ice-on-coil) ذات الانصهار الداخلي و أنظمة كبسولات الجليد تستخدم مجموعة مبردات تقوم بتبريد وسائط التبريد الثانوية إلى درجات حرارة تشكل الجليد . أما أنظمة الإنصهار الخارجي فربما تركب مع مجموعات التبريد أو مع محطات التبريد التي يتم تركيبها .

لقد استخدمت مواد (PCM) في الكثير من تطبيقات تخزين الطاقة الحرارية . ولكن لم تستخدم إلا حديثاً كوسيط تخزين في تطبيقات التكييف و التبريد . أكثر من ذلك ، فمعظم مواد (PCMs) المستخدمة في تخزين البرودة هي عبارة عن :

- ماءات أملاح غير عضوية .
- شموع برافينية عضوية.
- مزيج من هذا وذاك .

- قام كل من (Solomar et al 1991;BoHe et al.,2001) بتقديم دراسة نمذجة نظرية لتخزين البرودة و بحثا باحتمالات استخدام أنظمة تخزين البرودة التي تعتمد على مواد إل(PCMs) ، وناقشا عمليات تخزين البرودة الديناميكية و الستاتيكية .وقد وجدوا ان مادة Rubitherm RT5 (نقطة الانصهار7°C و الحرارة الكامنة للإنصهار158.3kj/kg) تبدو مادة مرشحة ممتازة كمادة ذات طور متغير لتخزين البرودة كونها مادة رخيصة الثمن ،ذات انصهار متجانس و ذات خصائص تمكنها من التبلور الذاتي كما أنها لا تعاني من مشاكل الصدأ والتبريد الزائد ، وتمتاز بالاستقرار بعد عدد كبير من الدورات الحرارية . [28]

- تم دراسة و اختبار الخصائص الحرارية ل Manganese(II) nitrate hexahydrete (نقطة الانصهار25.8°C والحرارة الكامنة للإنصهار 125.9 kj/kg) كمادة ذات طور متغير لاستخدامها في تطبيقات تخزين البرودة (Nagano et al,2003) . كما تم تقديم طريقة عامة لمزج واختبار مواد (PCMs) لاستخدامها في التخزين بالطريقة الكامنة . وقد توصلوا إلى أن كل الكلوريدات هي مواد فعالة في تعديل نقطة الانصهار للمركب ($Mn(NO_3)_2.6H_2O$) .وقد كان لإضافة $MnCl_2.4H_2O$ تأثير فعال على تعديل نقطة الانصهار وعلى تخفيض التبريد الزائد ومقدار الحرارة الكامنة للإنصهار.

إن هواء داخلي بدرجة حرارة 28°C خلال النهار و هواء خارجي بدرجة حرارة تحت 16°C ليلاً يمكن الاستفادة منهما لصهر و تصلب هذا المزيج .

- درس الباحث Chen et al. 2000 تجريبياً انخفاض الضغط في خزانات الطاقة الحرارية المملوءة بكبسولات (PCM) خلال عمليات الشحن. الكبسولات الأسطوانية الشكل تعتمد على الماء المضاف إليه عوامل تنوي(مواد تساعد على تشكيل النوى عند بداية التصلب) كمادة ذات طور متغير، و المادة المبردة هي محلول مائي من الإيتيلين غليكول . وقد أشارت النتائج إلى أن تخزين البرودة يمكن أن يتحقق بالكامل على شكل طاقة كامنة عندما تضبط درجة حرارة المادة المبردة لتكون أقل من درجة الحرارة التي تبدأ فيها النوى بالتشكل داخل المادة ذات الطور المتغير بنسبة 100% .

3-5 تدفئة البيوت الزجاجية الزراعية Greenhouse Heating

تستخدم البيوت الزجاجية الزراعية الشمسية على نطاق واسع حول العالم وذلك لزيادة الإنتاجية و لتحسين نوعية المزروعات إضافة لتخفيض استهلاك الطاقة التقليدية لتدفئة وتكييف المزروعات.

إن البيوت الزجاجية الناجحة و ذات المردود الأعلى هي البيوت التي يتم فيها التحكم بالبارامترات الحرارية كدرجة الحرارة والرطوبة و شدة الإشعاع الشمسي إضافة إلى التوفير في استهلاك الطاقة.

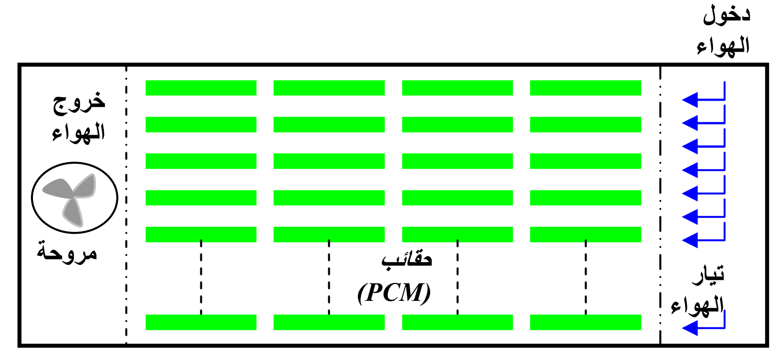
إن البحث في هذا المجال يستلزم دراسة مواد جديدة و وسائل تبادل حرارة وتخزين فعالة .

إن أكثر المواد ذات الطور المتغير استخداماً لهذه الأغراض هي Na2SO4.10H2O و $CaCl_2.6H_2O$ و PEG و البرافينات (KurKlu,1998) . [29]

قدم الباحث KurKlu,1998 ملخصاً عن البيوت الزجاجية التي تستخدم مواد (PCMs).

و قد وجد أن المواد الأكثر استخداماً على نطاق واسع في هذا المجال هي:Na2SO4.10H2O و $CaCl_2.6H_2O$ وذلك بسبب التكلفة المنخفضة و سعة التخزين العالية إضافة إلى أن لهذه المواد نقطة انصهار مناسبة لهذا الاستخدام .و لكن التبريد الزائد والحساسية الشديدة تجاه الرطوبة هي من أكثر التهديدات جدية لاستخدامها على المدى الطويل. [29]

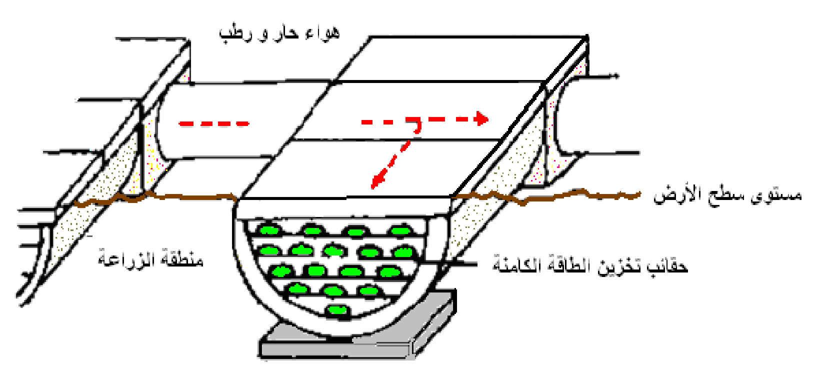
– الباحثين Nishina و Takakura (1990) استخدما Na_2SO_4.10H2O مع بعض الإضافات لمنع الانفصال الطوري أو التدهور لتدفئة بيت زجاجي في اليابان . الشكل/3-9/ يظهر منظرا عاماً للتصميم التجريبي .



الشكل /3-9/مخطط عام لنظام تخزين بمواد (PCM)

– استخدم الباحث Takakura(1992) البولي إيتيلين غليكول و $CaCl_2.6H_2O$ كمواد ذات طور متغير في نظام لتدفئة بيت زجاجي بمساحة أرضية $7.2m^2$ ، وقام بإجراء مقارنة لهذا النظام مع بيت زجاجي تقليدي . كان مردود نظام التدفئة الحاوي على مواد (PCM) المدمج مع لاقط شمسي 59% و كان هذا النظام قادراً على الحفاظ على درجة حرارة داخل البيت الزجاجي لا تقل عن 8°C ليلاً ،في حين انخفضت درجة الحرارة الخارجية إلى ما دون -6°C . [30]

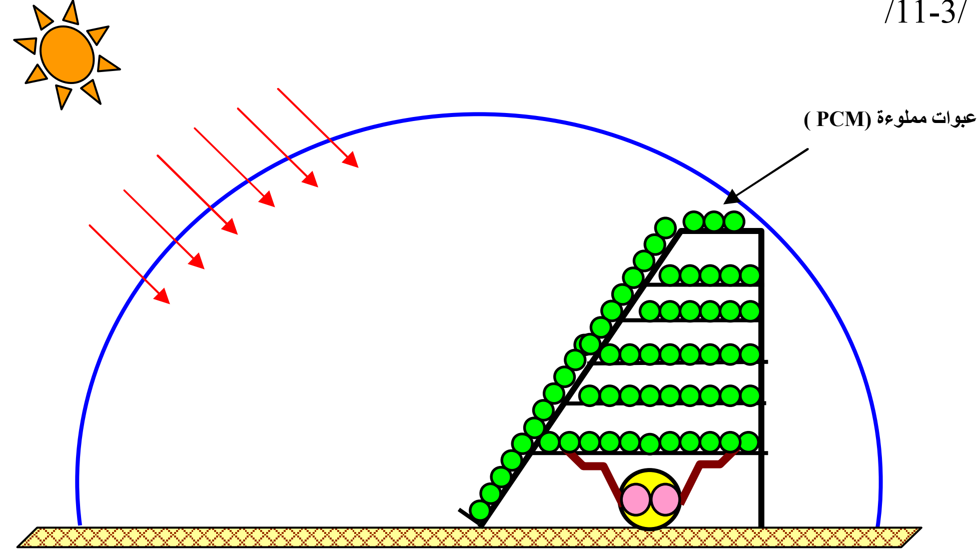
- أجرى مركز الأبحاث و التطوير الفرنسي دراسة لمشروع إنتاج الأزهار في بيت زراعي شمسي ذو زجاج مفرد بمساحة أرضية $500m^2$ و قد تم استخدام ton 13.5 من **$CaCl_2.6H_2O$** نقطة الانصهار(28°C) . الشكل /3-10/ يظهر ترتيب خزانات (PCM) و هي موضوعة تحت الأرض .



الشكل /3-10/نظام تخزين طاقة كامنة تحت الأرض

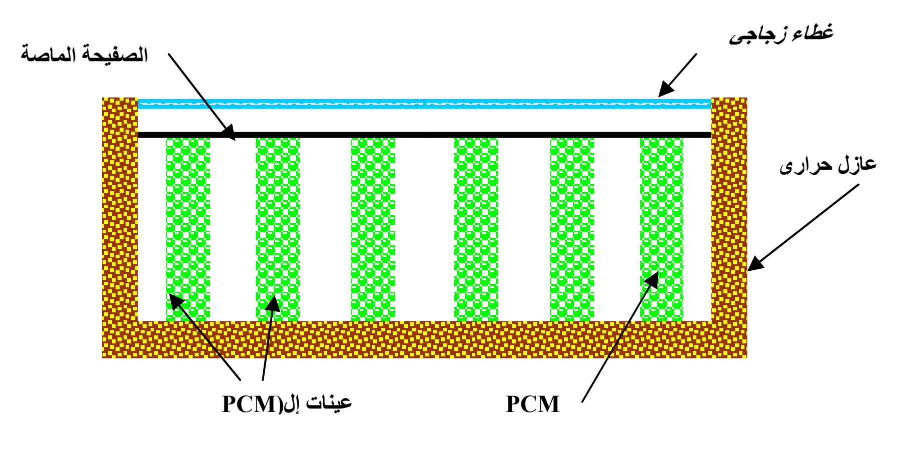
إن الطاقة الشمسية المتوفرة داخل البيت الزجاجي تنقل ويتم تخزينها في مواد (PCM) بالاعتماد على الهواء كوسيط ناقل للحرارة حيث يمرر الهواء عبر أقنية إلى مبادلات حرارية مستوية مملوءة بمواد (PCM) . لقد تم مقارنة أداء التصميم السابق مع بيت زجاجي تقليدي بنفس الشكل الهندسي و ينتج نفس النباتات ووجد أن النظام الذي يعتمد مواد (PCM) قد وفر ما نسبته 80% من استهلاك غاز البروبان مقارنة مع البيت الزجاجي التقليدي .و ذلك للحفاظ على نفس درجة الحرارة داخل كل بيت . [24]

- يمكن للمواد ذات الطور المتغير أن ترتب على قواعد داخل البيت الزجاجي كما هو موضح في الشكل /3-11/

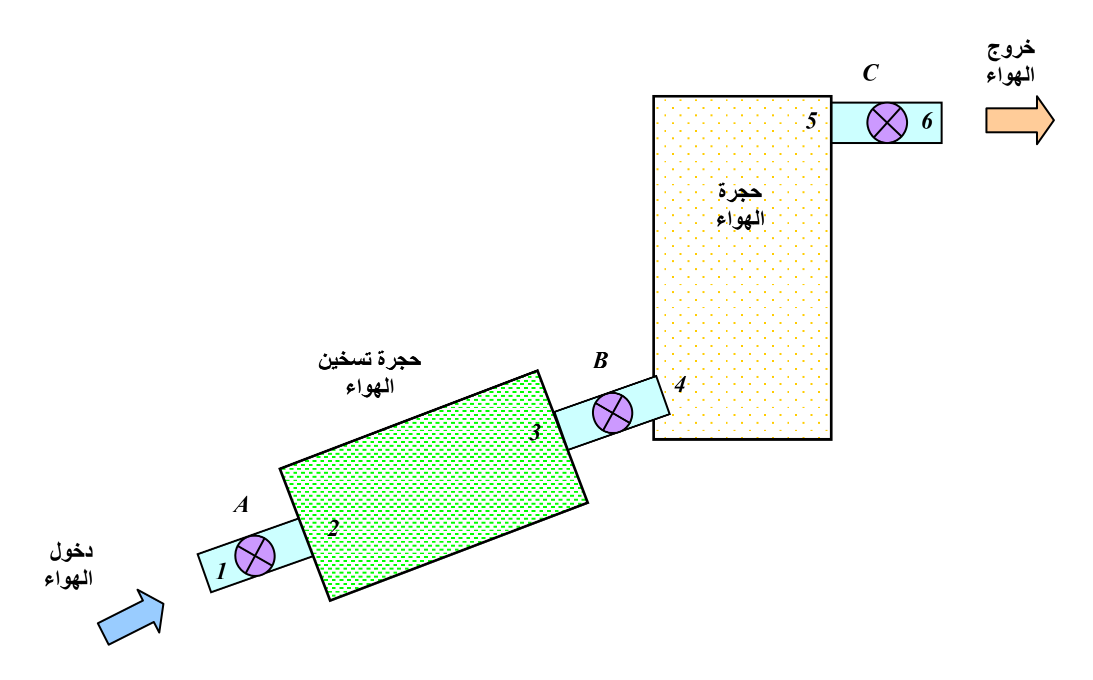


الشكل /3-11/ بيت زجاجي شمسي ذو نظام (PCM) لتخزين الطاقة الكامنة

و هذا النظام يكفل تسخين هذه المواد مباشرة من الأشعة الشمسية .
يتم في هذا النظام تدوير الهواء في البيت الزجاجي و عبر نظام التخزين و ذلك لزيادة معدل تبادل الحرارة خلال عمليات الشحن و التفريغ .
يتم الاستفادة من الطاقة الحرارية الكامنة المخزنة في الأوقات التي لا يتوفر فيها إشعاع شمسي و بذلك تتم المحافظة على درجة حرارة ثابتة داخل البيت الزجاجي . المادة ذات الطور المتغير في هذا التصميم كانت $Na2SO_4.10H2O$.
– الباحث Enible et al.(2002-2003) صمم و بنى و قيم أداء نظام تدفئة بالطاقة الشمسية يعمل بالتدوير الطبيعي باستخدام نظام تخزين بالطاقة الكامنة بمواد (PCM). [31]
النظام يتكون من : لاقط شمسي مسطح مدمج مع خزان طاقة كامنة يعتمد على شمع البرافين كمادة PCM . تم تحضير عينات مستطيلة ذات سماكة قليلة من شمع البرافين و وضعها داخل صناديق رقيقة مستطيلة الشكل هذه الصناديق مصنوعة من مادة ذات إيصالية حرارية عالية و هي تلعب دور الزعانف . تم ترتيب الصناديق الرقيقة داخل اللاقط بمسافات فاصلة متساوية فيما بينها كما هو موضح في الأشكال (12-3/a/ و12-3/b/) .
إن الفراغ الكائن بين كل عينتين متتاليتين يعمل كمسخن للهواء ، و كون هذه المسخنات موصولة إلى فتحات تسمح بمرور الهواء عبرها بالحمل الطبيعي .
يدخل الهواء بالحمل الطبيعي من فتحة الدخول عبر صمام التحكم A إلى حجرة التسخين و يغادرها عبر الصمام B إلى حجرة الهواء الساخن ثم يفرغ الهواء إلى الوسط الخارجي عبر الصمام C . وقد دلت النتائج على أنه من الممكن رفع درجة حرارة الهواء قبل دخوله إلى النظام بحدود 15°C . كما بلغ المردود المفيد للاقط حوالي 50% .



الشكل 12-3/a/مقطع عرضي في مسخن (الهواء-PCM)



الشكل 12-3/b/ رسم تخطيطي لمسخن هواء – PCM يعمل بالتدوير الطبيعي

إن هذا النظام مناسب للاستخدام كمجفف شمسي لتجفيف الحبوب و النباتات الطبية و بعض الأنواع التي لا تحتاج لأن تكون معرضة بشكل مباشر لأشعة الشمس .

3-6 الطباخات الشمسية Solar Cooking

تستخدم الطباخات الشمسية لطهي الطعام (الخضراوات ،اللحوم، الخبز ......) . وقد تم تطوير جيد للطباخ الشمسي الصندوقي سواءً من الناحية النظرية أو التصميمية . [20]

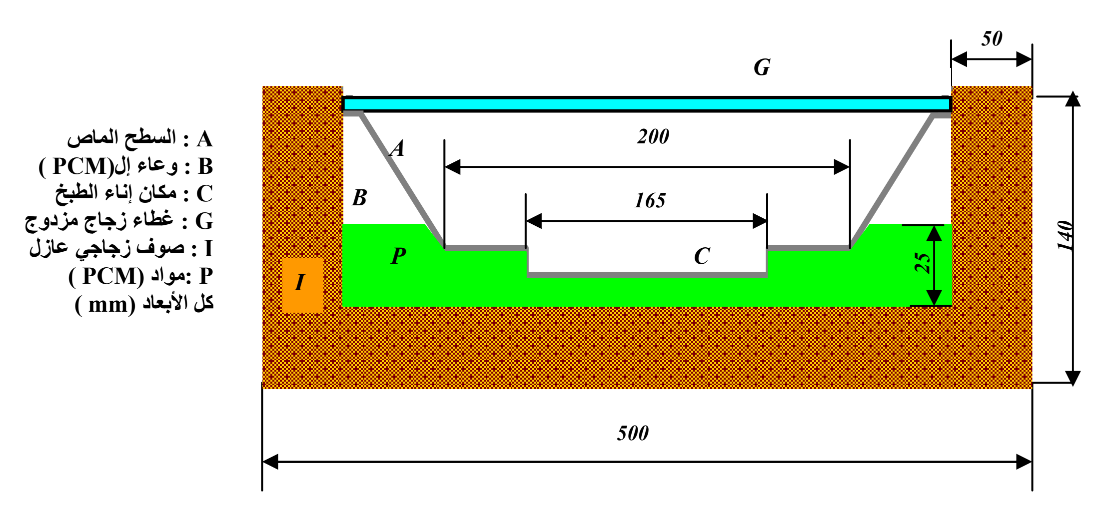
ولكن استخدام هذه الطباخات الشمسية على نطاق واسع لا يزال محدوداً بسبب عدم قدرتها على تخزين الطاقة ، بمعنى أن هذه الطباخات لا يمكن أن تستخدم في الظروف المناخية الغائمة أو خلال الليل . يمكن استخدام مواد (PCM) لتخزين الطاقة الشمسية على شكل حرارة كامنة نهاراً ، و بعد ذلك ، يمكن استخدام الطاقة المخزنة للطهي مساءً أو في الأوقات الغائمة . [20]

– لقد قام كل من (Buddhi and Sahoo,1997) بتصميم و تصنيع الطباخ الشمسي الصندوقي الحاوي على مواد (PCM) ليلائم الظروف المناخية في الهند . وقد تم استخدام ماركة تجارية من Stearic acid (نقطة الانصهار:55°C و الحرارة الكامنة للانصهار:161Kj/Kg) كمادة ذات طور متغير. [32]

– الشكل /13-3/ يظهر مخططاً تفصيلياً لطباخ شمسي صندوقي (لوعاء طهي واحد) يستخدم مواد (PCM) لتخزين الطاقة الشمسية .

تم لحام وعاء اسطواني بقطر (0.165m) و عمق (0.02m) في مركز الصفيحة الماصة (A) كما هو موضح في الشكل /13-3/ (C) . و يجب الحفاظ على قدر الطبخ هذا في مكانه بشكل

محكم بقوة على الصفيحة الماصة . هذا الوعاء يؤمن انتقال الحرارة من الصفيحة الماصة و (PCM)إلى الطعام المراد طهيه . أكثر من ذلك فقد تم إضافة زعانف من الألمنيوم لكل من الوجه الداخل للصفيحة الماصة و الوعاء الأسطواني . تم صنع الوعاء (B) من صفيحة من الألمنيوم و عزلت عن الوسط الخارجي بطبقة من الصوف الزجاجي من الجوانب و الأسفل .

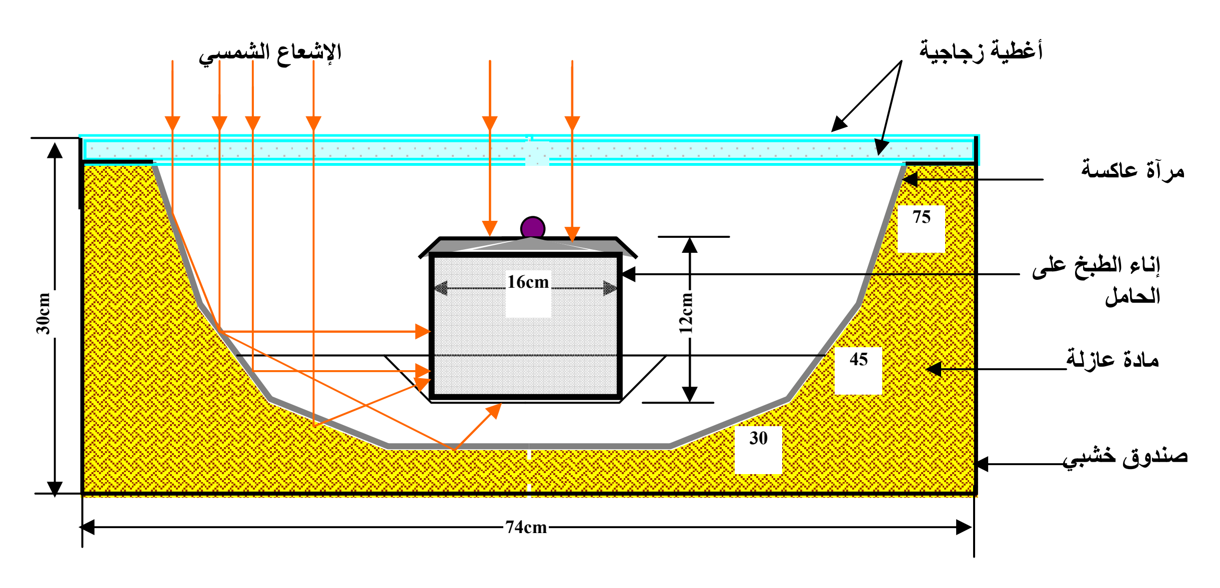


الشكل /3-13/ مخطط تفصيلي لطباخ شمسي صندوقي يستخدم مواد إل(PCM)

بعد ذلك تم ملء الوعاء (B) ب 3.5kg من Stearic acid كمادة ذات طور متغير و تم التأكد من أن (PCM) على اتصال جيد بالسطح السفلي للصفيحة الماصة (A) . تم تثبيت مرايا زجاجية مسطحة أعلى الطباخ تعمل هذه المرايا كعواكس إضافية للأشعة الشمسية و كغطاء زجاجي للطباخ الشمسي عندما لا يتعرض الطباخ الشمسي للأشعة الشمسية. تم أيضاً طلاء الصفيحة الماصة (A) بطلاء أسود عاتم .

لقد أظهرت النتائج التجريبية جدوى استخدام المواد ذات الطور المتغير كوسيط لتخزين الطاقة الحرارية في الطباخات الشمسية . حيث أنه من الممكن استخدام هذا الطباخ لطهي الطعام حتى في فترات المساء . كما تمكنه من تأمين درجة حرارة ثابتة تقريباً للصفيحة حتى وقت متأخر من المساء.

-الباحث Domanski et al.(1995) بحث في إمكانية استخدام الطباخ الشمسي خلال الفترات التي لا يتوفر فيها إشعاع شمسي و ذلك باستخدام المواد ذات الطور المتغير (PCM). فصمم لهذا الغرض طباخ شمسي ذو خزان (PCM). الشكل/3-14/.[32].



الشكل /3-14/ الطباخ الشمسي ذو الوعاء الحاوي على (PCM)

لهذا الغرض تم صنع وعاءين اسطوانيين لهما نفس المركز (السماكة: 0.0015m) مصنوعين من الألمنيوم تم وصل هذين الوعاءين مع بعضهما من الأعلى بواسطة أربعة براغي لتشكلان معاً وعاء ذو جدار مزدوج بفراغ بين الجدار الداخلي و الجدار الخارجي القطر الداخلي للوعاء 0.014m و القطر الخارجي 0.18m و الفراغ الحلقي بينهما 0.02m تم تغطية هذا الفراغ بغلاف من الألمنيوم قابل للإزالة . وتم تعبئة الفراغ الحلقي هذا بحوالي (1.1Kg) من Stearic acid (69°C) أو بحوالي (2Kg)من Magnesium nitrate hexahydrete (89°C) ، بحيث يترك حيزاً ليسمح للمادة ذات الطور المتغير بالتمدد بحرية عند الانصهار .

تم تقييم أداء هذا الطباخ خلا عمليات الشحن و التفريغ و لعدة مرات متكررة و عند شروط مختلفة، و دلت النتائج على أن أداء الطباخ يعتمد على عدة بارامترات منها شدة الإشعاع الشمسي وكتلة وسيط الطبخ والخصائص الفيزيائية و الحرارية لمادة (PCM) . وقد وجد ان المردود الحراري الإجمالي للطباخ خلال عملية التفريغ أكبر ب(3-4) مرات من مردود الطباخات العاملة على البخار أو التي تستخدم الأنبوب الحراري ، التي يمكن أن تستخدم في الطباخات الشمسية الداخلية .

يكون في هكذا تصميم ،معدل انتقال الحرارة من (PCM) إلى وعاء الطبخ منخفض وبالتالي يلزم وقت أطول لطبخ وجبة المساء . [33]

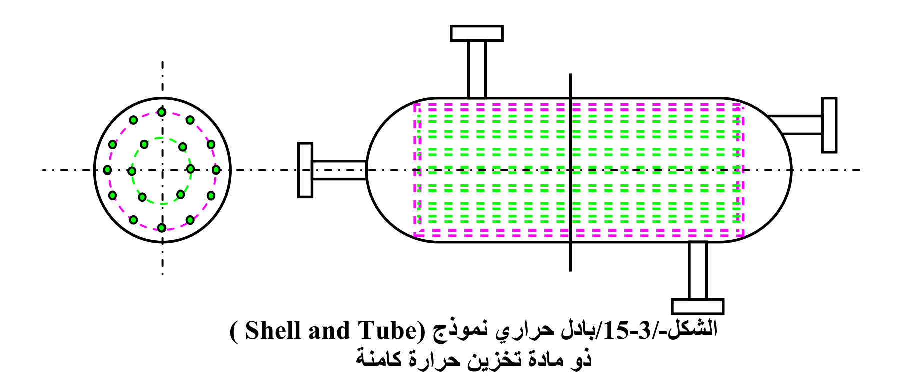
3-7 أنظمة استرجاع الحرارة المفقودة Waste Heat Recovery Systems

تطرح أنظمة تكييف الهواء حرارة (كامنة و محسوسة) ، والتي تشكل فيها الحرارة المحسوسة حوالي 15-20% من كمية الحرارة الكلية المطروحة (Zhang,1999) . و تكون الحرارة المطروحة في هذه الأنظمة عالية نسبياً (65°C>) عند استخدام الفريون مثلاً كوسيط تبريد . ولذلك يمكن استعادة هذه الحرارة باستخدام مراكم والحصول على الحرارة بدرجة حرارة أعلى . [34]

–قام الباحث Buddhi(1997) بتصميم و تصنيع مبادل حراري نموذج (Shell and tube) في نظام لاسترجاع الحرارة المطروحة باستخدام مواد (PCM) الشكل /3-15/ .

في هذه الدراسة تم استخدام Stearic acid (59°C,198Kj/Kg) كمادة ذات طور متغير ولتعزيز الإيصالية الحرارية الفعالة للنظام تمت المحافظة على المسافة القطرية بين أنابيب المبادل بحدود 3-4 Cm . و تم ملء المبادل بحوالي 50Kg من ماركة تجارية من Stearic acid . وتم استخدام الماء كوسيط ناقل للحرارة لشحن وتفريغ (PCM) .

تم قياس كل من درجة الحرارة الخارجية و معدل التدفق و درجات حرارة (PCM) وذلك بفاصل زمني بين كل قراءتين متتاليتين مقداره 15 دقيقة .



الشكل-/3-15/بادل حراري نموذج (Shell and Tube)
ذو مادة تخزين حرارة كامنة

- لقد دلت النتائج التجريبية لهذا التصميم على جدوى استخدام مواد (PCM) كوسيط تخزين طاقة في أنظمة استرجاع الحرارة المفقودة.
- نتيجة الإيصالية الحرارية المنخفضة لمواد (PCM) فإن مردود انتقال الحرارة الإجمالي سيكون منخفض ويجب استخدام زعانف لزيادة فعالية تبادل الحرارة .
- تجدر الإشارة أنه تم اختيار القيم التصميمية لهذا التصميم (مثل المسافة بين الأنابيب ،معدلات التدفق الكتلي، أبعاد الزعانف) بحرص وذلك لتحسين مردود المبادل الحراري إلى أقصى حد . [35]

الفصل الرابع

الدراسة التحليلية الرياضية لعملية انتقال الحرارة عبر الواجهة الزجاجية

The mathematical analyze to heat transfer Process through glass façade

4-1 الدراسة النظرية:

تمثل الواجهة الزجاجية الحد الأضعف في هيكل البناء الذي يفصل الوسط الداخلي للبناء عن الوسط الخارجي . ففي الأوقات الباردة تقدر نسبة الضياعات الحرارية التي تحدث عبرها بحدود 10−25% من الضياع الحراري الإجمالي للمكان المدفأ ، أما في الأوقات الحارة فالإشعاع الشمسي الزائد النافذ عبرها عادة ما يقود إلى زيادة في حمل التكييف .

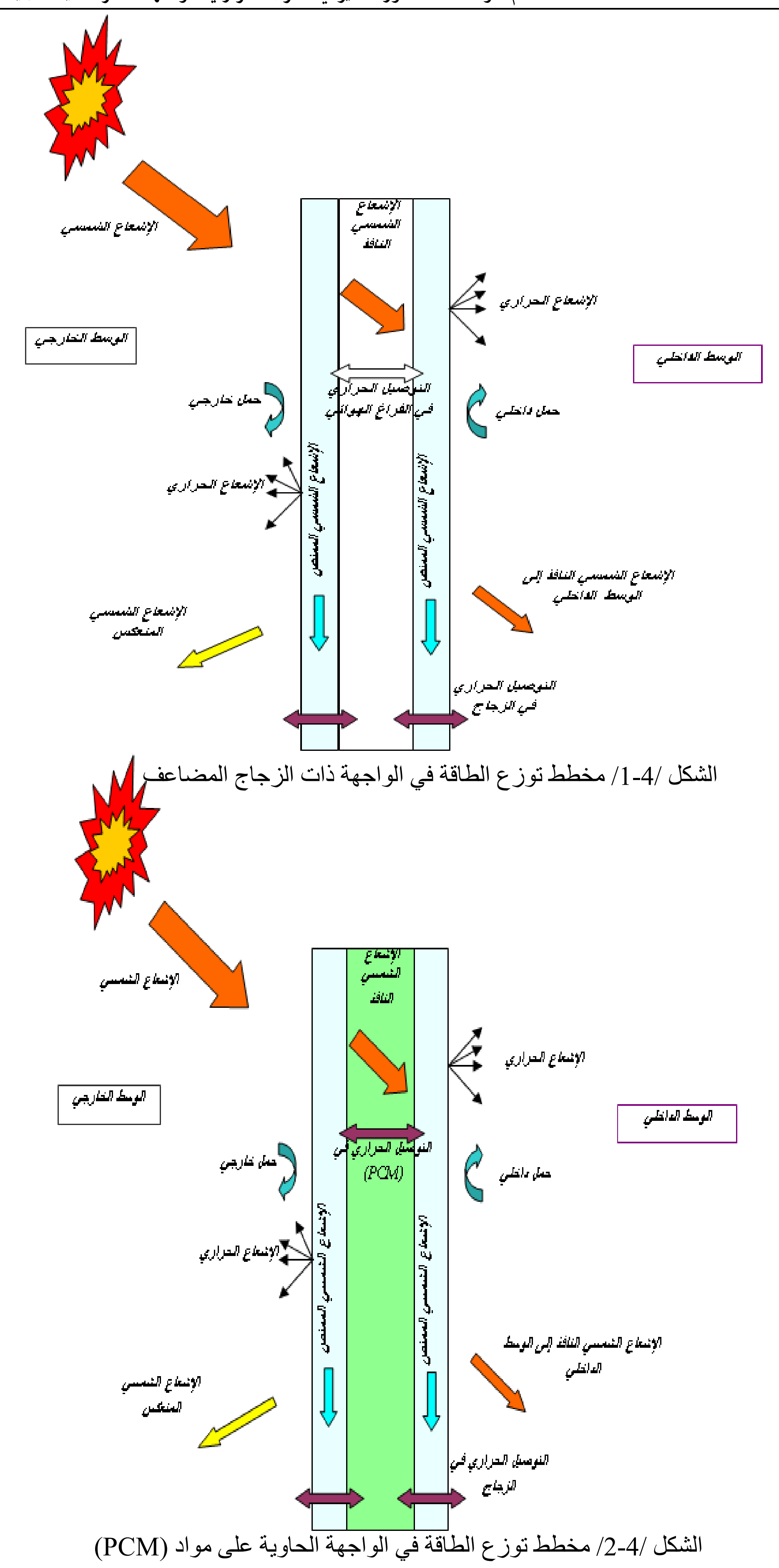
لهذه الأسباب ولأسباب أخرى فقد تم تكريس الكثير من الجهد و البحث وذلك للوصول إلى تصميم واجهات زجاجية فعالة من الناحية الحرارية وقادرة على الحفاظ على مستوىً مناسباً من الارتياح الحراري .

- فالواجهات ذات الخصائص الانتقائية للأشعة الشمسية هي مثال على الواجهات الفعالة حراريا"، وهي تكون مغطاة بطبقة من مادة انتقائية تسمح بتغيير قيم النفاذية و الانعكاسية و الامتصاصية للواجهة.

يمكن أن تصمم الطبقة بحيث يمكنها أن تمتص أو تعكس الإشعاع الساقط عليها حسب طول الموجة لهذه الأشعة .

- كما تم أيضا تصميم واجهات زجاجية مفرغة ذات أداء حراري عالي ، حيث تم تقليل انتقال الحرارة بالحمل و التوصيل إلى حد كبير .
- أيضاً تم استخدام أنواع من الغازات الماصة التي تؤمن عزل حراري جيد للواجهات الزجاجية .
- ما سنقوم به هو دراسة إمكانية اعتماد طريقة جديدة تمكننا من تخفيض الضياعات الحرارية للواجهات الزجاجية باستخدام المواد ذات الطور المتغير (PCM) .

تمثل الأشكال /4-1/ و /4-2/ مخطط توزع الطاقة للواجهة الزجاجية ذات الزجاج المضاعف و مخطط توزع الطاقة للتصميم المقترح للواجهة المملوءة بمواد (PCM).



الشكل /4-1/ مخطط توزع الطاقة في الواجهة ذات الزجاج المضاعف

الشكل /4-2/ مخطط توزع الطاقة في الواجهة الحاوية على مواد (PCM)

4-2 حساب بارامترات الأداء الحراري: [36]

- عادةً ما يعبر عن الأداء الحراري للواجهات الزجاجية بمعامل انتقال الحرارة الإجمالي U والمقاومة الحرارية الإجمالية R . و في كلا الحالتين فإن القيم المقاسة أو المختبرة يجب أن تتوافق مع المواصفات القياسية حسب الجمعية الأمريكية (ASHRAE) .

في حالة واجهة ذات ألواح زجاجية متعددة يعطى معامل انتقال الحرارة الإجمالي بالعلاقة التالية :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{b_i}{\lambda} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{h_{c,j}} + \frac{1}{h_{\text{int}}}} \quad ...... \quad .... \quad ..... \qquad (4)$$

حيث يمثل N عدد ألواح الزجاج ، $h_{C,i}$:هو معامل انتقال الحرارة للفراغ الهوائي .

- هناك أيضاً بارامتر هام لمعرفة الأداء الحراري للواجهة الزجاجية هو معامل كسب الحرارة الشمسي و يحدد هذا المعامل كنسبة بين الإشعاع الشمسي الذي يدخل إلى الحيز الداخلي ويتألف من مكونين:

المكون الأول :الإشعاع الشمسي الذي يعبر الواجهة و يمتص من قبل الوسط الداخلي

المكون الثاني :هو الإشعاع الشمسي الذي يتم امتصاصه من قبل الألواح الزجاجية و من ثم ينتقل إلى الوسط المحيط حسب طرق انتقال الحرارة .

يتم تحديد المكون الأول بواسطة الحسابات التي تحتاج إلى معرفة الخصائص الضوئية للواجهة و بيانات الإشعاع الشمسي ، أما المكون الثاني فيتحدد عبر التحليل الضوئي الشمسي و عبر تحليل انتقال الحرارة .

إن جزءاً من الإشعاع الشمسي الممتص من قبل الواجهة سوف يعبر مباشرة إلى الوسط الداخلي و يتوقف مقدار هذا الجزء على المقاومة الحرارية الإجمالية لمكونات الواجهة .

والطاقة الإجمالية الواصلة إلى الوسط الداخلي عبر الواجهة تعتمد على البارامترات الهندسية للواجهة و على الخصائص الحرارية والضوئية لمكونات الواجهة.

4-2-1 حساب معامل الكسب الحراري الشمسي للواجهة

يمكن الحصول على المعادلة التي تحدد معامل الكسب الحراري الشمسي F من معادلة موازنة الطاقة للواجهة ويمكن تمثيل عملية انتقال الحرارة عبر الواجهة ذات الزجاج المضاعف على الشكل التالي:

$q_1^* = a_i I_0$; $q_2^* = a_2 I_0$

T_{ext} —q_1— $T_{1,ext}$ —q_2— $T_{1,int}$ —q_3— T_{3e} —q_4— T_{3i} —q_5— T_{int}

$\frac{1}{h_{ext}}$, $\frac{b1}{\lambda 1}$, $\frac{1}{h_c}$, $\frac{b3}{\lambda_3}$, $\frac{1}{h_{int}}$

من الشكل السابق و من معادلات موازنة الطاقة يمكن كتابة المساواة التالية :

$$(T_{ext}-T_{\text{int}})=$$
$$(T_{ext}-T_{1e})+(T_{1e}-T_{1i})+(T_{1i}-T_{3e})+(T_{3e}-T_{3i})+(T_{3i}-T_{\text{int}})........(5)$$

بالتعويض نجد :

$$(T_{ext}-T_{\text{int}})=$$
$$q_5\left(\frac{1}{h_{ext}}+\frac{b_1}{\lambda_1}+\frac{1}{h_c}+\frac{b_3}{\lambda_3}+\frac{1}{h_{\text{int}}}\right)-\frac{(\alpha_1+\alpha_2).I_0}{h_{ext}}-\frac{\alpha_2 I_0 b_1}{\lambda_1}-\frac{\alpha_2 I_0}{h_c}........(6)$$

حيث تمثل q_5 التدفق الحراري الواصلة إلى داخل الخلية التجريبية عبر الواجهة الزجاجية.

إن الحد المقترن ب q_5 يمثل مقلوب معامل انتقال الحرارة الإجمالي و بالتالي يمكن كتابة المعادلة السابقة على الشكل التالي :

$$q_5=U(T_{ext}-T_{\text{int}})+\frac{\alpha_1 I_0}{h_{ext}}.U+\alpha_2 I_0\left[\frac{U}{h_{ext}}+\frac{U.b_1}{\lambda_1}+\frac{U}{h_c}\right]........(7)$$

- يمثل الحد الأول من الطرف الأيمن للمعادلة السابقة تدفق الطاقة نتيجة فرق درجات الحرارة بين الوسط الداخلي و الوسط الخارجي .
- يمثل الحدان الثاني و الثالث من الطرف الأيمن الطاقة المتدفقة و التي يعاد توجيهها إلى الوسط الداخلي بعد أن يتم امتصاص جزء من الإشعاع الشمسي الساقط من قبل ألواح الزجاج .

إن العلاقة التي تعطي الكسب الحراري الكلي يجب أن تحتوي على الإشعاع الشمسي النافذ مباشرة إلى الوسط الداخلي ،أي أن:

$$q=q_5+\tau_{total}I_0 \qquad \Rightarrow$$
$$q=U(T_{ext}-T_{\text{int}})+\frac{\alpha_1 I_0}{h_{ext}}.U+\alpha_2 I_0\left[\frac{U}{h_{ext}}+\frac{U.b_1}{\lambda_1}+\frac{U}{h_c}\right]+\tau_{total}I_0.......(8)$$

و إذا أردنا حساب كمية الطاقة النافذة إلى الوسط الداخلي نتيجة الإشعاع الشمسي ،فإنه يجب حذف الحد الأول من الطرف اليميني من المعادلة السابقة فينتج لدينا :

$$q_{solar}=\frac{\alpha_1 I_0}{h_{ext}}.U+\alpha_2 I_0\left[\frac{U}{h_{ext}}+\frac{U.b_1}{\lambda_1}+\frac{U}{h_c}\right]+\tau_{total}I_0.........(9)$$

لحساب معامل الكسب الحراري الشمسي يتم تقسيم المعادلة السابقة على الإشعاع الشمسي الساقط I_0فنحصل على :

$$F=\frac{\alpha_1}{h_{ext}}.U+\alpha_2\left[\frac{U}{h_{ext}}+\frac{U.b_1}{\lambda_1}+\frac{U}{h_c}\right]+\tau_{total}..........(10)$$

في الشروط الغير مستقرة (العابرة) ،يحسب الكسب الحراري الشمسي الكلي من موازنة الطاقة على الشكل :

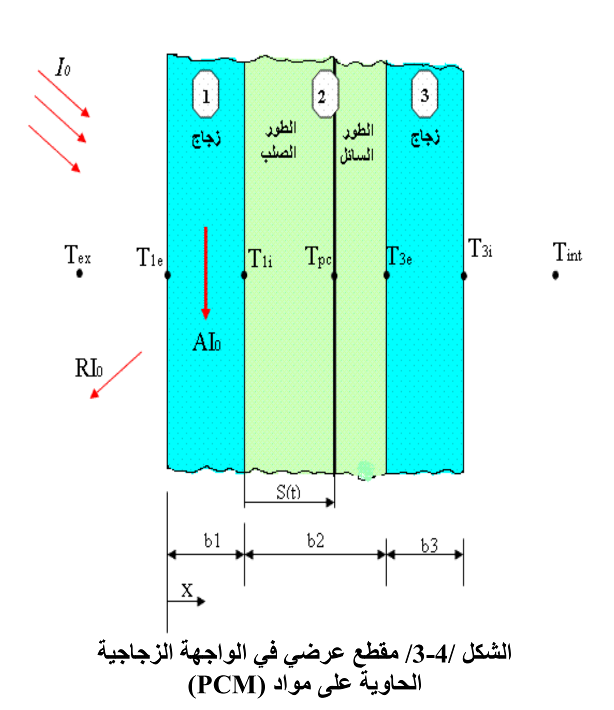
$$q_{total} = \frac{1}{n\Delta x}\sum_{i=1}^{n} h_{\text{int}}\Delta x(T_{i,2m_{\upsilon}+m+1} - T_{\text{int}}) + \sigma_i \Delta x(T^4_{i,2m_{\upsilon}+m+1} - T^4_{\text{int}}) + \tau_{total} I_0 \Delta x ....(11)$$

4-3 الواجهة الزجاجية المملوءة بمواد (PCM)

لإيجاد النموذج الرياضي لعملية انتقال الحرارة في الواجهة المملوءة بمواد (PCM) تم افتـراض أن الخواص الحرارية للمادة ذات الطور المتغير ثابتة ولا يحدث أي انتقال للحرارة بالحمل في الطـور السائل للمادة.

- يتبادل اللوح الخارجي للواجهة الزجاجية الحرارة مع الوسـط المحـيط بواسـطة الحمـل الطبيعي و الإشعاع .
- أمّا انتقال الحرارة في المادة ذات الطور المتغير فتتم بالإشعاع و بالتوصيل (لأننـا أهملنـا انتقال الحرارة بالحمل في الطور السائل للمادة نظراً لقلة سماكة مادة (PCM).
- أمّا اللوح الداخلي للواجهة فيحدث عبره انتقال للحرارة بالحمل الطبيعي و بالإشعاع.

يوضح الشكل /3-4/مقطعاً عرضياً في الواجهة الزجاجية الحاوية على مواد (PCM)



الشكل /3-4/ مقطع عرضي في الواجهة الزجاجية الحاوية على مواد (PCM)

يُعطى الشكل العام للمعادلة التفاضلية ثلاثية البعد لكل منطقة بالعلاقة التالية:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}) - \frac{1}{\rho_i . c_i}(\frac{\partial I}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial y} + \frac{\partial I}{\partial z}) ....(12)$$

من أجل الأغراض العملية ولتسهيل الدراسة سوف نكتفي بدراسة إجراء انتقال الحرارة باتجاه واحد هو اتجاه المحور x.

و بالتالي تصبح المعادلة التفاضلية لكل منطقة على الشكل التالي :

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_i . c_i} \frac{\partial I}{\partial x} \quad \text{...(13)}$$

إن الرمز i يدل على رقم كل من: لوح الزجاج الخارجي ومادة (PCM) ولوح الزجاج الداخلي على الترتيب .

الشروط الحدية لكل منطقة من المناطق المذكورة أعلاها هي على الشكل التالي:

(a) – الشرط الحدي: عندما x=0

يحدد هذا الشرط على السطح الخارجي للواجهة الزجاجية الذي يتبادل الحرارة مع الوسط المحيط بالحمل والإشعاع.

$$-\lambda_1 \left.\frac{\partial T_1}{\partial x}\right|_{x=0} = h_{G.ext}(T_{ext} - T_{1e}) + \alpha_{x=0}^{*} I \quad \text{...(14)}$$

حيث تمثل α^* امتصاصية الزجاج

$h_{G.ext}$ معامل انتقال الحرارة الإجمالي للزجاج الخارجي للواجهة و هو عبارة عن مجموع معاملات انتقال الحرارة بالحمل و الإشعاع و يعطى بالعلاقة التالية :

$$h_{G.ext} = h_{c.ext} + h_{R.ext}$$

و يعطى معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بالعلاقة التالية :

$$h_{R.ext} = \varepsilon\sigma(T_{1_e}^2 + T_{ext}^2)(T_{1_e} + T_{ext})$$

حيث : ε إصداريه الزجاج

$\sigma = 5.67\times10^{-8}$ ثابت Stefan-Boltzmann

(b) – عندما $x=x_1$ في هذه الحالة الشرط الحدي يتوقف على الحالة الفيزيائية للمادة ذات الطور المتغير (سائلة– مزيج سائل/صلب– صلبة) و بالتالي سيكون لدينا ثلاثة شروط حدية ممكنة .

من موازنة الطاقة عند تلامس (PCM – الزجاج):

(b_1) – مادة (PCM) في الطور السائل ، عندما تكون درجة حرارتها أعلى من درجة حرارة التغير الطوري T_{pc} .

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}_{x=x_1} + \alpha^*{}_{x=x_1}.I = -\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial x_{x=x_1}} \quad ....(15)$$

(b_2)– عندما تبدأ أول طبقة صلبة من مادة (PCM) الملامسة للوجه الداخلي للوح الزجاج الخارجي بالتشكل .

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_{x=x_1}} + \alpha^*{}_{x=x_1}.I = \rho H \frac{dS(\tau)}{d\tau} - \lambda_{SL} \frac{\partial T_L}{\partial x_{x=x_1}} \quad ....(16)$$

(b_3)– عندما تتصلب طبقة (PCM) الملامسة للوجه الداخلي للــوح الزجــاج الخــارجي بالكامل .

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_{x=x_1}} + \alpha^*_{x=x_1}.I = \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial x_{x=x_1}} \quad ....(17)$$

(C) – عندما $x=x_1+S(\tau)$ ، هذا يتطابق مع موقع السطح البيني الفاصل بــين الطــورين الصلب و السائل لمادة (PCM) في المنطقة التي يحدث فيها التغير الطوري نتيجة الكسب الحراري .

معادلة التوازن الحراري عند تقدم عملية التحول الطوري تُعطى بالعلاقة :

$$-\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial x} + \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial x} + \alpha^*_{x=x_1+S(\tau)} I = \rho H \frac{dS(\tau)}{d\tau} \quad ....(18)$$

حيث : $T_L=T_S=T_{PC}$

(d) – بنفس الطريقة المتبعة أعلاه عندما $x=x_1$ ، فالشروط الحدية المعتمدة عنــدما يكــون $x=x_2$ سوف تتوقف على حالة (PCM) بالقرب من السطح الزجاجي الداخلي للواجهة ، وبالتــالي يكــون لدينا ثلاثة شروط حدية:

(d_1) – عندما يكون $x_1<S(\tau)<x_2$ ، في هذه الحالة عملية التصــلب مســتمرة و كــلا الطــورين موجودين :

$$\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial x_{x=x_2}} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_{x=x_2}} \quad ....(19)$$

(d_2) – في نهاية عملية التصلب و الطبقة الأخيرة السائلة

$$-\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial x_{x=x_2}} + \alpha^*_{x=x_2} I = \rho H \frac{dS(\tau)}{d\tau} - \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_{x=x_3}} \quad ....(20)$$

حيث: $T_S=T_3=T_{PC}$

(d_3) – PCM في الحالة الصلبة بالكامل

$$-\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial x_{x=x_2}} + \alpha^*_{x=x_2}.I = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_{x=x_2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (21)$$

(e) – عندما $x=x_3$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial \tau_{x=x_3}} = h_{G.\text{int}}(T_3 - T_{\text{int}}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (22)$$

$h_{G.int}$: معامل انتقال الحرارة الإجمالي للزجاج الداخلي للواجهة و هو عبارة عن مجموع معاملات انتقال الحرارة بالحمل و الإشعاع و يعطى بالعلاقة التالية:

$$h_{G.\text{int}} = h_{c.\text{int}} + h_{R.\text{int}}$$

و يعطى معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بالعلاقة التالية:

$$h_{R.\text{int}} = \varepsilon\sigma(T_{3_i}^2 + T_{\text{int}}^2)(T_{3_i} + T_{\text{int}})$$

بحل هذه المعادلات يمكننا تحديد تغيرات درجة الحرارة مع الزمن و من ثم تحديد سماكة ألواح الزجاج المناسبة و عدد الألواح و مقدار الفراغ الأنسب بين الألواح إضافة لتحديد مادة (PCM) المناسبة للاستخدام إضافة إلى أنه يمكننا التنبؤ بقيم درجات الحرارة في كل نقطة من النقاط المحددة و ذلك حسب شدة الإشعاع الشمسي و الخصائص الحرارية للواجهة المستخدمة.

الفصل الخامس

الدراسة التجريبية لاستخدام المواد ذات الطور المتغير في الواجهة الزجاجية

The experimental studying of (PCM) implementation in glass façade

5-1 مقدمة:

يهدف العمل التجريبي الذي قمنا به إلى دراسة إمكانية استخدام طريقة جديدة اقتصادية و فعالة من الناحية الحرارية لتحسين خواص العزل الحراري للواجهات الزجاجية من خلال زيادة العطالة الحرارية لهذه الواجهات باستخدام المواد ذات الطور المتغير .

5-2 العمل التجريبي:

- بعد أن أجرينا الدراسة المرجعية لمواد (PCM) و تطبيقاتها تم التركيز على مواد ذات درجة حرارة تحول طوري قريبة من حدود الارتياح الحراري و تمتلك خواص حرارية و فيزيائية و كيميائية مناسبة إضافة إلى سعرها الرخيص و متوفرة في السوق المحلية.
- لقد قمنا بمراسلة العديد من الشركات الدولية المختصة في تصنيع هذه المواد لمعرفة إمكانية الحصول على منتجاتها ولكن لم يكن لأي من الشركات المنتجة لهذه المواد وكيل أو مكتب في سوريا أو حتى في الشرق الأوسط .
- كما تم البحث عن هذه المواد في السوق المحلية و للأسف لا توجد حتى الآن شركة محلية تقوم بتصنيع و إنتاج هذه المركبات ولذلك قررنا أن نقوم بتركيب بعض هذه المواد بالاعتماد على المكونات الأولية لها.
- تم تركيب مادة رخيصة الثمن (شبه مجانية) و ذات خصائص حرارية جيدة و هذه المادة هي عبارة عن محلول ملحي يسمى أيوتكتيك ($NaCl + Na_2SO_4.10H_2O$) ذو درجة حرارة تحول طوري 18°C .

الجدول/5-1/ يوضح مكونات المركب مع النسبة الوزنية المئوية لكل مكون فيه:

المكون	النسبة المئوية الوزنية (%)
Na_2SO_4	37%
H_2O	46%
NaCl	17%

الجدول /5-1/ النسب الوزنية المئوية للعناصر المكونة لمادة (PCM)

5-3 الخصائص الحرارية للمادة المركبة

يبين الجدول /5-2/ الخصائص الحرارية للأيوتكتيك المركب

الخاصية	الرمز	القيمة	الواحدة
درجة حرارة التحول الطوري	T_{PC}	18	°C
السعة الحرارية للطور الصلب	C_{so}	1950	J/kg.K
السعة الحرارية للطور السائل	C_{li}	3550	J/kg.K
الحرارة الكامنة للتحول الطوري	H	2.86×10^5	J/kg.K
الإيصالية الحرارية	λ	0.49	W/m.K
الكثافة	ρ	1490	kg/m^3

الجدول /5-2/ المواصفات التقنية للأيوتكتيك ($Na_2SO_4+10H_2O+NaCl$)

المصدر /PCM energy. Ltd/

تُعطى كمية الطاقة الحرارية المخزنة في مقدار m(kg) من المركب بالعلاقة التالية:

$$Q_s = m\left[C_{so}(T_{Ph} - T_1) + H + C_{li}(T_2 - T_{Ph})\right]$$

حيث m هي كتلة المادة، و C_{so} و C_{li} يمثلان السعة الحرارية لكل من الطور الصلب و الطور السائل و H الحرارة الكامنة للتحول الطوري .

فمثلاً خلال تسخين 1kg من هذه المادة من الدرجة 10°C إلى الدرجة 35°C تكون كمية الطاقة الحرارية المخزنة :

$$1950(18-10) + 2.86\times10^5 + 3350(35-18) = 0.340Mj$$

5-3-1 سلوك مادة PCM (الأيوتكتيك) أثناء الشحن و التفريغ

عند تسخين الأيوتكتيك إلى ما فوق الدرجة 18°C يعطي مزيج مكون من محلول و من Na_2SO_4 و NaCl وفق الصياغة التالية :

$$Na_2SO_4.10H_2O + NaCl + energy \leftrightarrow Na_2SO_4 + 10H_2O + NaCl$$

يتم تخزين الطاقة عندما يكون اتجاه التفاعل من اليسار إلى اليمين مع إضافة الحرارة.

إن كمية الطاقة الكلية المضافة تعتمد على مجال درجات الحرارة التي سخنت فيه المادة وكمية الطاقة هذه تضم كمية الحرارة المضافة بشكل محسوس للمزيج حتى الوصول إلى درجة حرارة التحول الطوري مضافاً إليه الحرارة الكامنة للانصهار اللازمة لحصول التحول الطوري إضافةً إلى كمية الطاقة المضافة بشكل محسوس لتسخين Na_2SO_4 و المحلول إلى درجة الحرارة النهائية.

إن استخلاص الطاقة المخزنة من المادة هي عملية عكوسة فعندما يتحرك التفاعل الموضح في الصياغة المذكورة أعلاه من اليمين إلى اليسار ينعكس التأثير الحراري.

5-4 طريقة التحضير

5-4-1 تركيب العينة المخبرية

في البداية و كعينة مخبرية تم تحضير عينة تجريبية وزنها 100g في المختبر و تحوي نفس النسب المحددة للمواد الداخلة في تركيب مادة (PCM).

و بغية الحصول على نتائج دقيقة فقد تم استخدام مكونات نقية (مخبرية وليست تجارية) إضافة إلى استخدام ماء مقطر.

5-4-1-1 طريقة التركيب:

-تم ملء وعاء زجاجي بكمية من الماء المقطر(46g) ثم تم وضع الوعاء على سخان لرفع درجة حرارة الماء.

-تم إضافة 17g من الملح NaCl إلى الماء المقطر بالتدريج مع التحريك و التسخين المستمر .

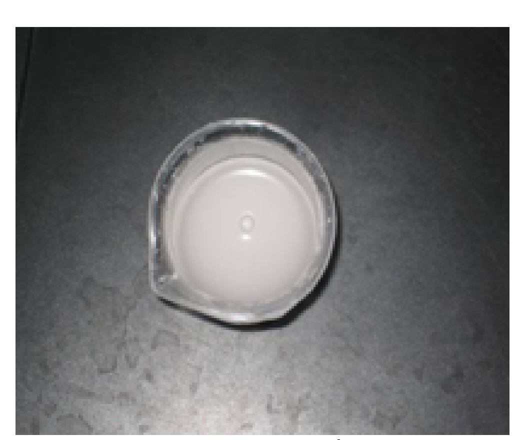
- استمر التحريك حتى ذاب كامل الملح(NaCl) في الماء.

-بعد ذلك تمت إضافة37g من الملح (Na_2SO_4) بالتدريج إلى المحلول بحيث تم إضافة من (6-7g) من هذا الملح كلما ارتفعت درجة حرارة المحلول بمقدار خمسة درجات و ذلك مع التحريك المستمر(بواسطة مغناطيس دوار وضع في أسفل الوعاء الزجاجي).

- استمر التسخين والتحريك المتواصلين حتى أصبح مظهر المزيج متجانساً .

- بعد ذلك تم إيقاف التسخين مع استمرار التحريك حتى برد المزيج وأصبح بدرجة حرارة المخبر (20C°).

- لقد حصلنا بعد ذلك على مزيج متجانس أبيض اللون بشكل(كريما) كما هو موضح في الشكل



شكل المزيج النهائي



قوام متجانس للمركب

الشكل /5-1/ العينة المخبرية التي تم تحضيرها مخبرياً

– تم بعد ذلك تعبئة المركب الناتج في حوجلة و ذلك لإجراء اختبار الدورة الحرارية:

لقد خضع المزيج الناتج لأكثر من 200 دورة حرارية مسرعة و ذلك بوضع العينة في حمام ماء ساخن بدرجة حرارة 50°C حتى ذوبان المركب بالكامل و من ثم تم وضع العينة في براد بدرجة حرارة 8°C حتى تجمد المركب بالكامل. و لم تتم ملاحظة أي تغير على قوام المزيج فقد بقي متجانساً إلى حد كبير على الرغم من أنه في الشكل /2-5/ يمكن أن نلاحظ انفصال جزء من المحلول نتيجة فرق الكثافة .



الشكل /2-5/

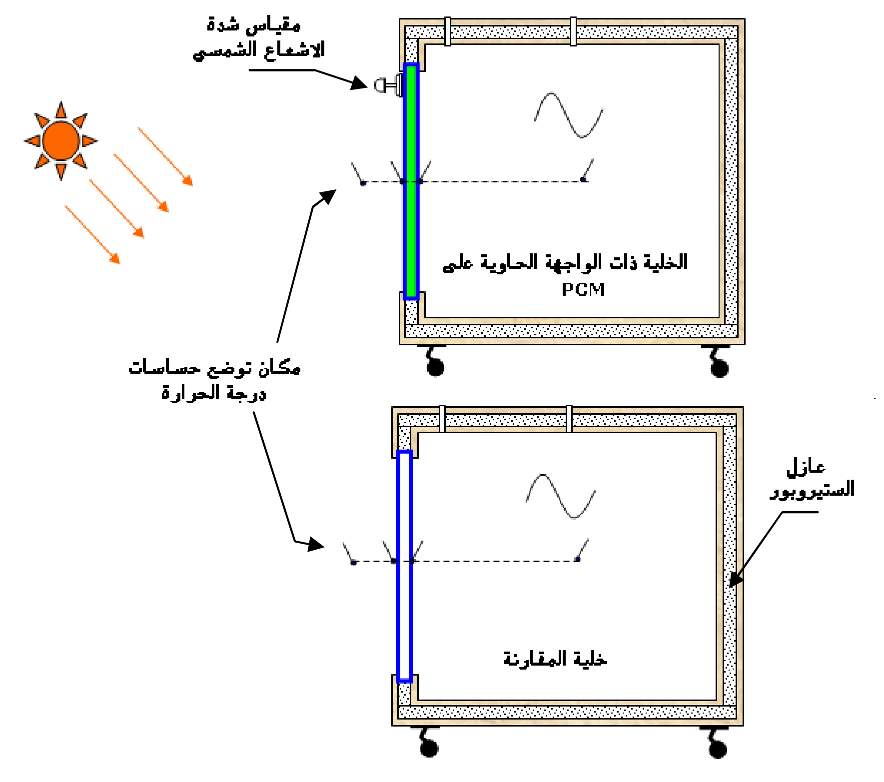
2-4-5 تحضير المنشأة التجريبية

من أجل دراسة فعالية أداء الواجهة الزجاجية الحاوية على المواد ذات الطور المتغير تم إنشاء نموذجين لغرفتين (خليتين تجريبيتين) الأولى ذات واجهة زجاجية مزدوجة مملوءة بالمادة ذات الطور المتغير والثانية ذات واجهة مزدوجة لا تحوي أي مواد لاستخدامها كمرجع للمقارنة مع الخلية الأولى.

- تم تصنيع الخليتين التجريبيتين بحيث تكونان متشابهتين بالكامل مع اختلاف وحيد هو أن إحداهما مملوءة بالمادة ذات الطور المتغير وكانت الأبعاد الخارجية لكل خلية m(1×1×1) و أبعاد الواجهة الزجاجية m (0.9×0.9×0.9).
- الواجهة الزجاجية ذات زجاج مضاعف ذي سماكة 8mm لكل لوح مع فراغ بينهما مقداره 10mm ،وتم تصنيع الواجهات الزجاجية المزدوجة بحيث تكون محكمة الإغلاق باستثناء فتحة تعبئة تم تركها في أعلى الواجهة و يمكن إغلاقها بسدادة .

- تم تصنيع جدران هاتين الخليتين من ألواح مزدوجة من الخشب بسماكة 6mm لكل لوح مع لوح عازل بينهما من الستيروبور بسماكة 6cm.ولضمان تحقيق العزل الكامل للحيز الداخلي للخلايا عن الوسط الخارجي تم تعبئة الحواف الجانبية للخلايا بالسيليكون.
- تم وضع الخليتين بجانب بعضهما البعض بحيث لا تشكل إحداهما ظلاً على الأخرى و تم توجيههما بحيث تكون الواجهات الزجاجية نحو الجنوب و يكون الكسب الحراري من الأشعة الشمسية الساقطة عليهما عبر الواجهات.
- تم تثبيت ثلاثة حساسات لقياس درجة الحرارة في كل خلية في الأماكن التالية (على الوجه الخارجي للواجهة الزجاجية، على الوجه الداخلي للواجهة الزجاجية، في داخل الخلية) إضافة إلى حساس لقياس درجة حرارة الوسط المحيط بالخلايا و مقياس لشدة الإشعاع الشمسي، إن أي اختلاف في السلوك الحراري للخلايا التجريبية سوف يكون ناتجاً عن المواد ذات الطور المتغير الموضوعة في الواجهة الزجاجية.

يمثل الشكل/3-5/ رسماً تخطيطياً للخلايا التجريبية و الشكل /4-5/ يمثل صورة لإحدى الخلايا التجريبية التي تم تصميمها.



الشكل /3-5/ رسم تخطيطي للخلايا التجريبية



الشكل /5-4/تمثل الخلية التجريبية بعد تركيب الحساسات في أماكنها

5-4-2 تحضير المنشأة التجريبية

5-4-3 تحضير الكمية المطلوبة من الأيوتكتيك

بعد الانتهاء من العمل المخبري تم تركيب كمية كافية من الأيوتكتيك لوضعها في الواجهة الزجاجية

- بدايةً تم تركيب 1kg من المركب ومن ثم تم حساب حجمه فكان 0.670L
- حجم الفراغ في الواجهة الزجاجية :

$$V = 0.9 \times 0.9 \times 0.01 = 0.0081 m^3 = 8.1 L$$

و بالتالي فكمية الأيوتكتيك المطلوبة ستكون:

$$m = 8.1 / 0.67 = 12.08 Kg$$

تم تحضير الكمية المذكورة أعلاه بنفس الطريقة التي تم فيها تحضير العينة المخبرية و بنفس النسب الوزنية المحددة.الشكل /5-5/ يظهر الكمية التي تم تحضيرها:



الشكل/5-5/ الكمية التي تم تركيبها



الشكل /5-6/يظهر الأيوتكتيك و هو في الحالة الصلبة

بعد ذلك تم تعبئة واجهة زجاجية لإحدى الخلايا من خلال فتحة التعبئة بواسطة قمع بلاستيكي. أمـــا خلية المقارنة تُركت كما هي.

الشكل /5-7/توضح الخلية بعد تعبئة الواجهة بالمادة :



مادة (PCM) منصهرة





مادة (PCM) متجمدة

الشكل /5-7/ الخلية التجريبية بعد ملئها بمواد (PCM)

5-5 القياسات و النتائج:

بعد تعبئة الواجهة الزجاجية بالمادة ذات الطور المتغير التي تم تركيبها تم البدء بدراسة تغيرات درجات الحرارة في النقاط المحددة في كل خلية مع الزمن إضافة إلى قياس تغيرات شدة الإشعاع الشمسي عند ظروف مناخية مختلفة

-دقة أجهزة قياس درجات الحرارة 1%

-دقة قياس شدة الإشعاع الشمسي 1.5%

لتقليل أخطاء القياس إلى الحد الأدنى و لتوخي الدقة في أخذ القراءات تم أخذ ست قراءات كل ربع ساعة و من ثم تم حساب القيم الوسطية التكاملية للمقادير المقاسة كل ربع ساعة ثم تم حساب القيم الوسطية للمقادير المقاسة لكل ساعة فحصلنا على قيمة واحدة لكل عامل خلال كل ساعة .و قد تم حساب القيمة الوسطية التكاملية للمقادير المقاسة وفق العلاقة التالية :

$$T_{aI} = \frac{\left[\dfrac{T_{a1} + T_{a6}}{2} + \Sigma T_{a\,2\to 5}\right]}{5}$$

يرمز الدليل I إلى القيمة الوسطية التكاملية خلال الجزء من التجربة .

تم تسجيل القيم المقاسة في جداول الكترونية (Excel) بغية رسم المنحنيات البيانية للقيم المقاسة.

لمعرفة الدور الذي يمكن أن تلعبه هذه المواد في الظروف المختلفة تمت القياسات في فترات مختلفة و في ظروف مناخية مختلفة و قد أخذت قياسات في نهاية شهر كانون الثاني (الجو بارد) و في منتصف شهر شباط (الجو متقلب) و في بداية شهر تموز(الجو حار) للعام 2008 .

5-4-4-1 نتائج القياس

لقد تم إجراء القياسات للمقادير التالية:

- شدة الإشعاع الشمسي.
- درجة حرارة الوسط المحيط.
- درجة حرارة الوجه الخارجي لواجهة كل خلية.
- درجة حرارة الوجه الداخلي لواجهة كل خلية.
- درجة الحرارة الداخلية في كل خلية.

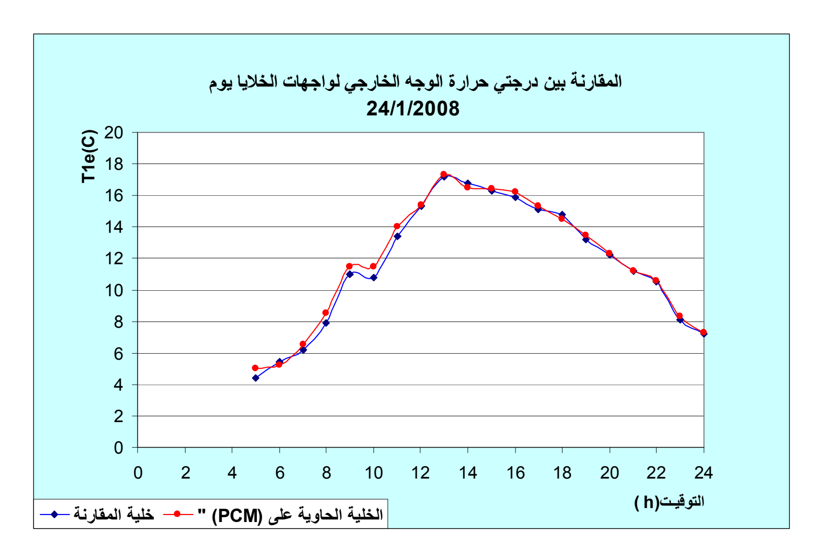
تم مقارنة كل قيمة مقاسة في الخلية ذات الواجهة الحاوية على مواد (PCM) مع نظيرتها في خلية المقارنة وذلك من خلال خطوط بيانية تمثل تغير هذه القيم مع الزمن .

الأشكال التالية تمثل مقارنة بين نتائج القياسات التي تم تسجيلها عند ظروف مناخية مختلفة .

أولاً: نتائج القياسات التي أجريت في يومي 24و 25 من شهر كانون الثاني لعام 2008

- ❖ الجو بارد نسبيا
- ❖ متوسط شدة الإشعاع الشمسي $I=300W/m^2$
- ❖ متوسط درجة الحرارة الخارجية $T_{ext}=11°C$

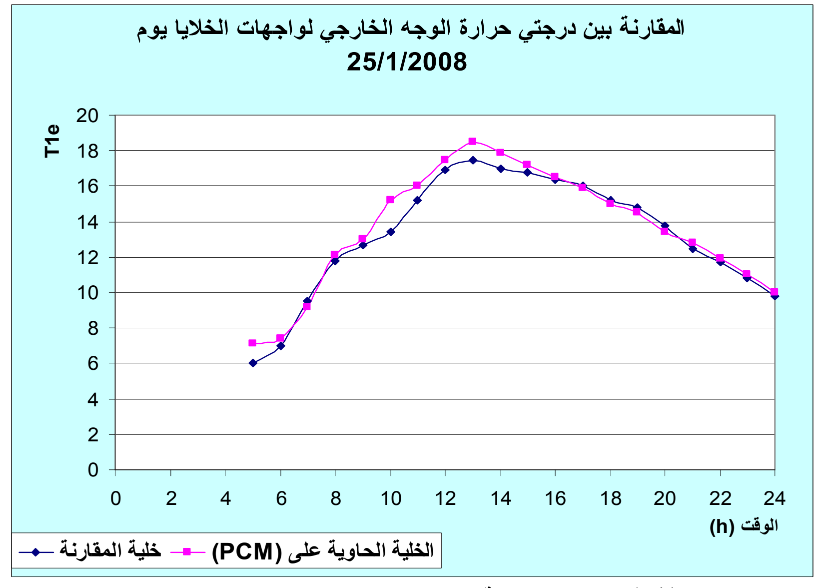
- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 24/1/2008



الشكل /5-8/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي

لواجهتي الخليتين يوم 24/1/2008

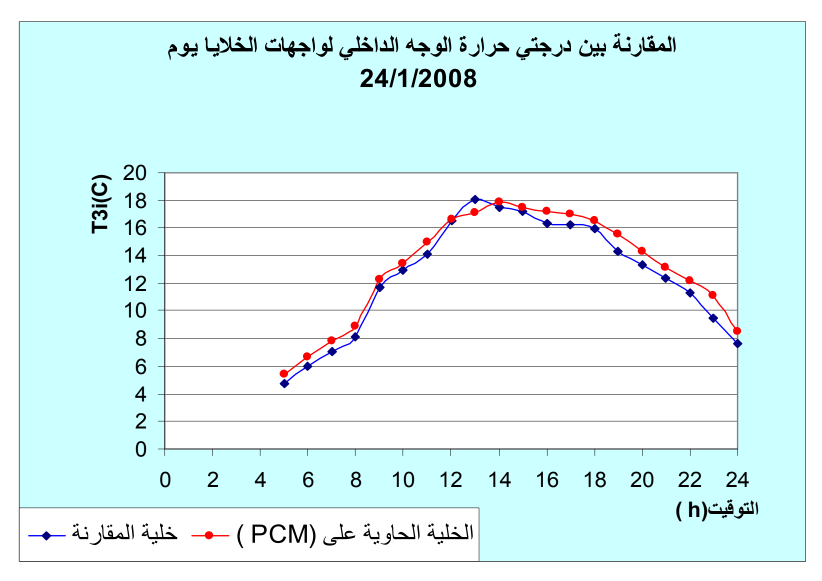
- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 25/1/2008



الشكل /5-9/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي

لواجهتي الخليتين يوم 25/1/2008

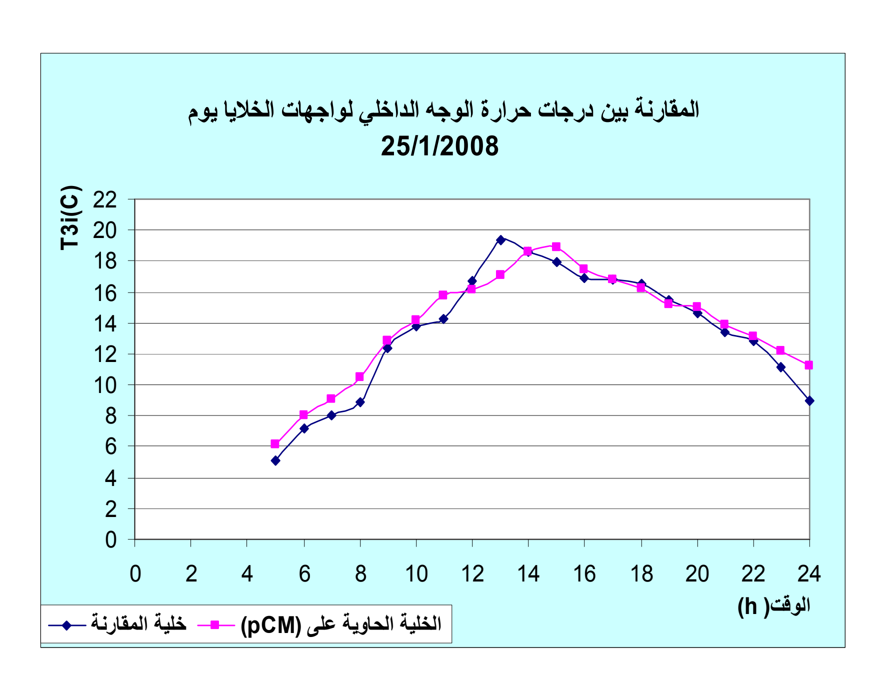
- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 24/1/2008



الشكل /5-9/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي

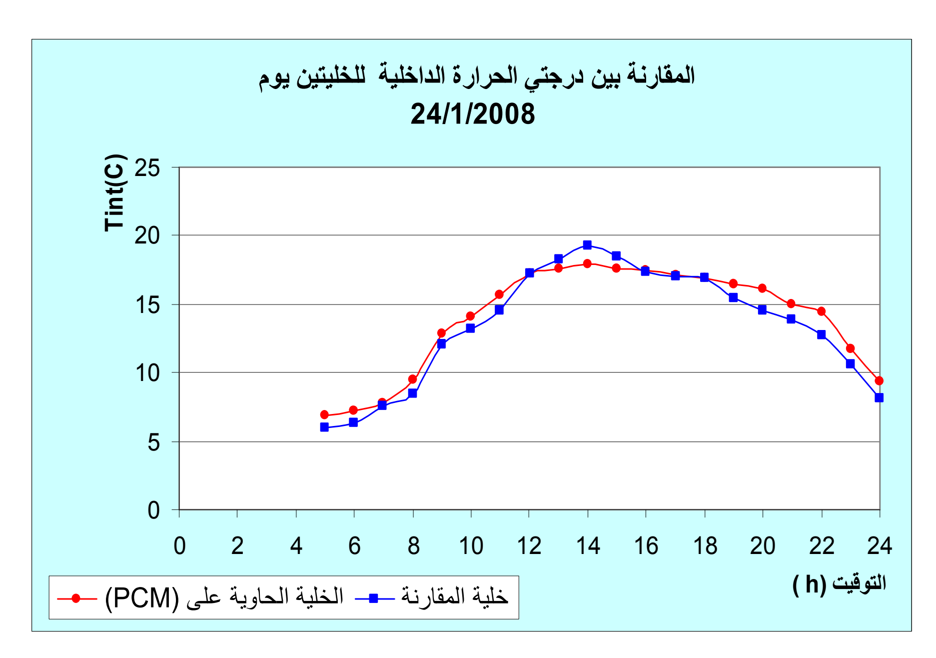
لواجهتي الخليتين يوم 24/1/2008

- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 25/1/2008



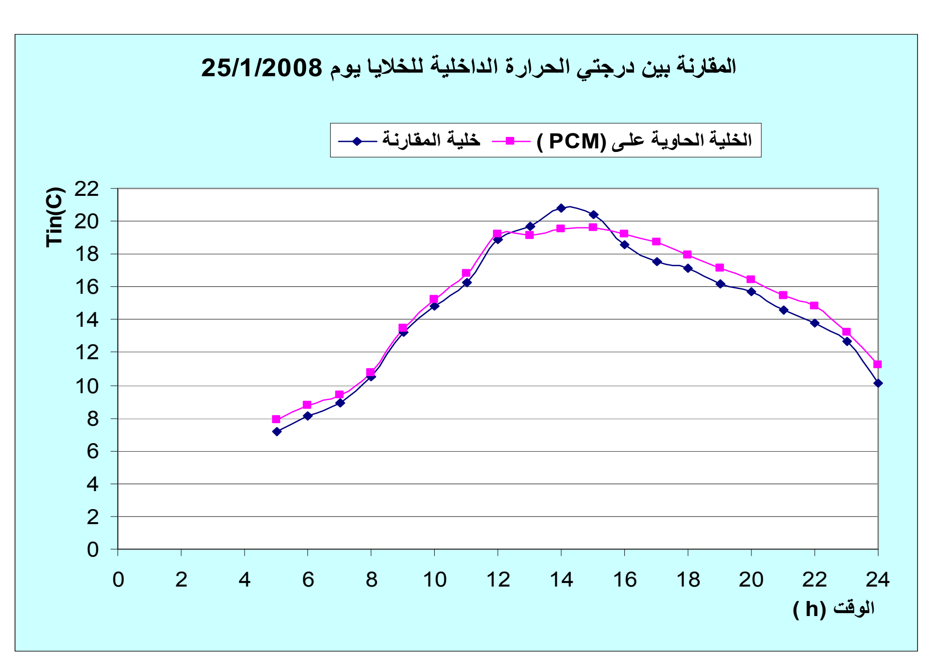
الشكل /5-10/ تغير درجة حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم

- المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 24/1/2008



الشكل /5-11/ المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 24/1/2008

- المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 25/1/2008

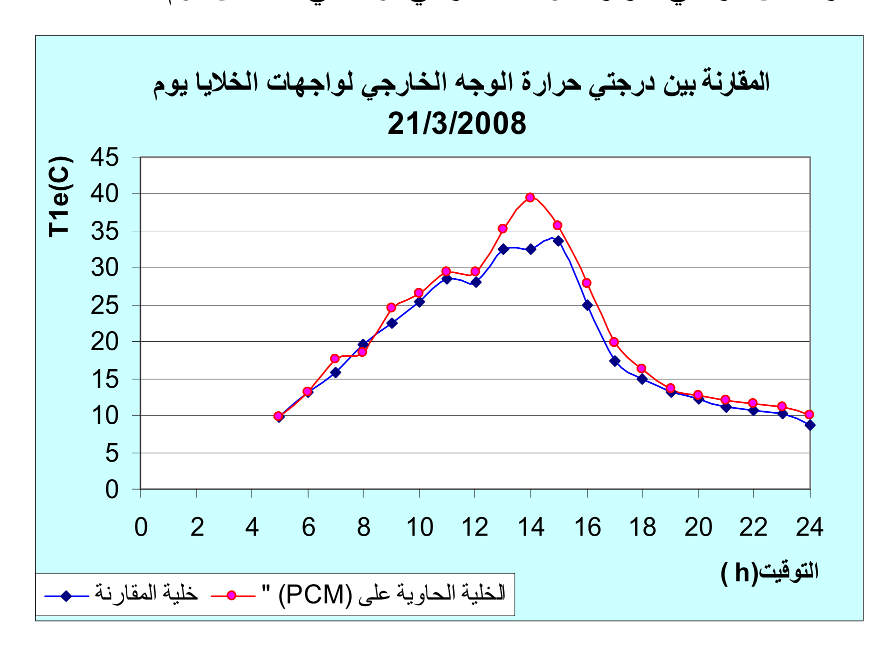


الشكل /5-12/ المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 25/1/2008

ثانياً: نتائج القياسات التي أجريت في يومي 21و 22من شهر آذار 2008

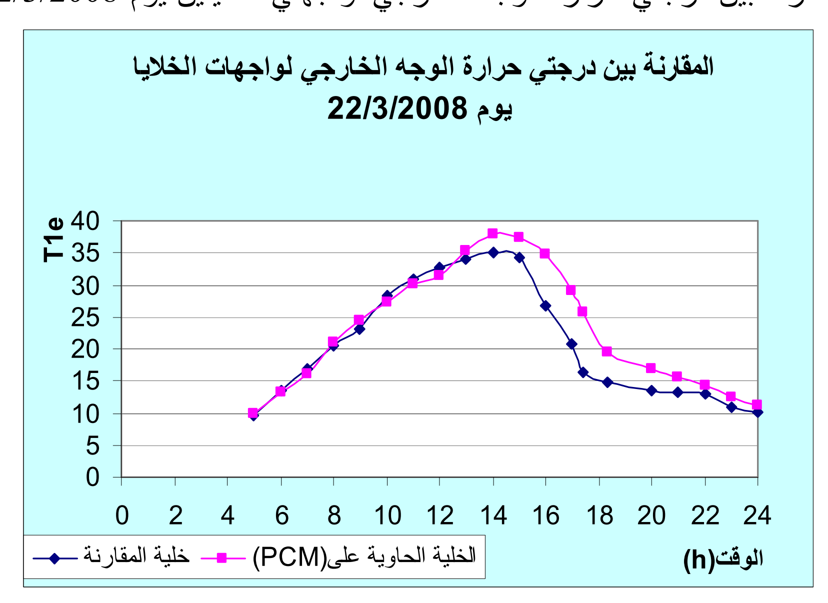
- ❖ الجو معتدل
- ❖ متوسط شدة الإشعاع الشمسي $I=500W/m^2$
- ❖ متوسط درجة الحرارة الخارجية $T_{ext}=18°C$

- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 21/3/2008



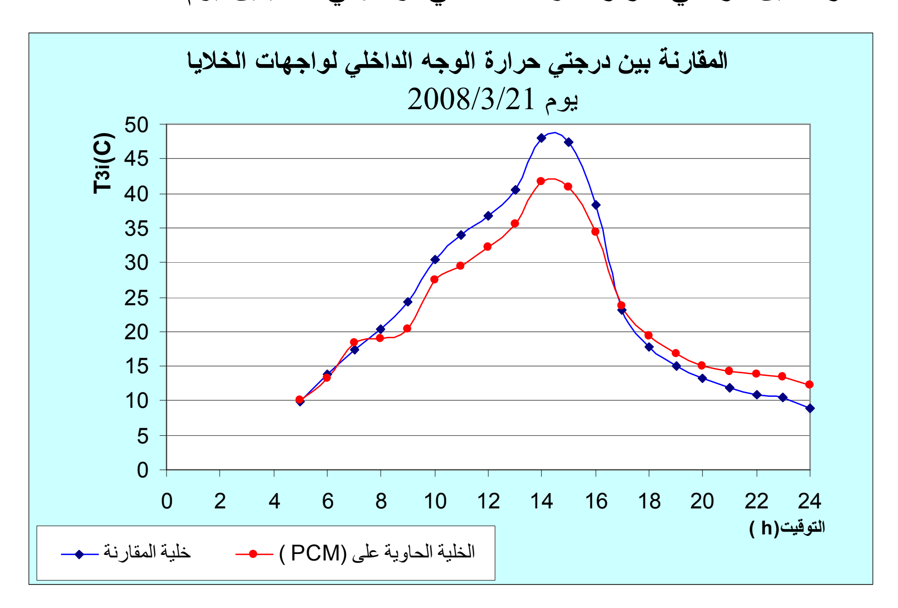
الشكل /5-13/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 2008/3/21

- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 22/3/2008



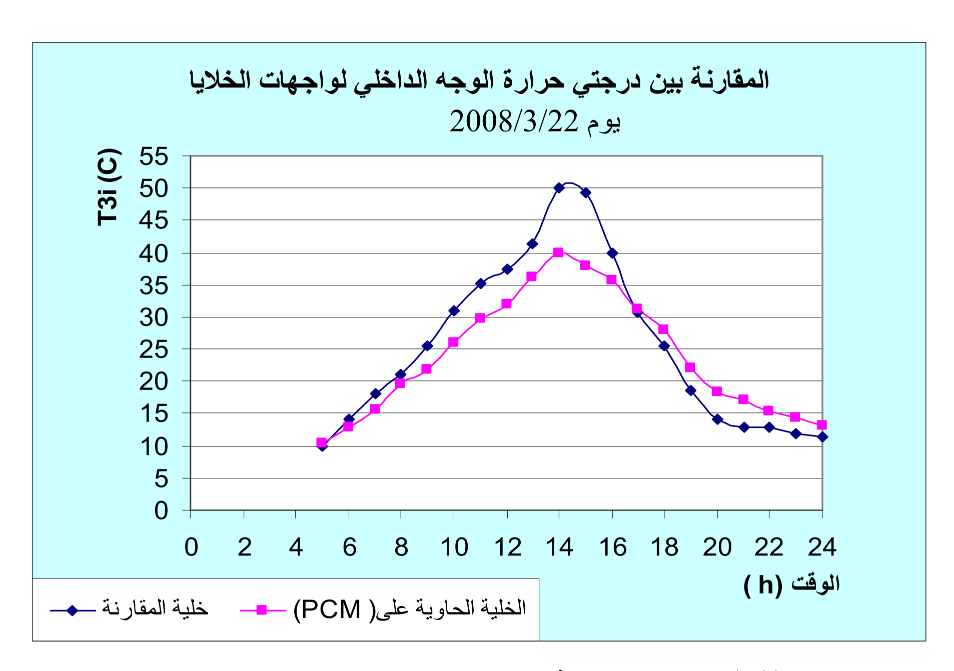
الشكل /5-14/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 22/3/2008

- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 21/3/2008



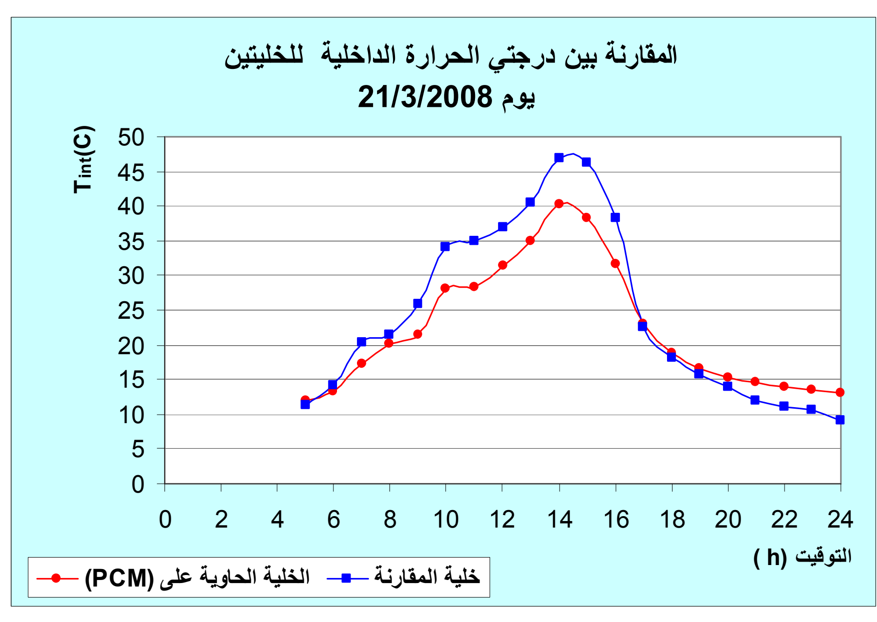
الشكل /5-15/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 21/3/2008

- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 22/3/2008



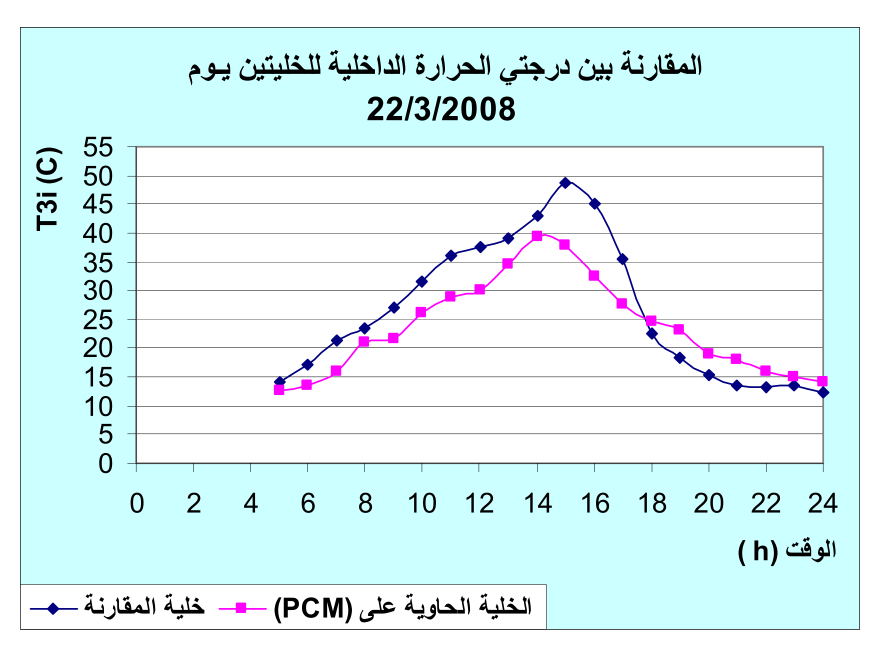
الشكل /5-16/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين وم 22/3/2008

- المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 21/3/2008



الشكل /5-17/ المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم
21/3/2008

- المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 22/3/2008

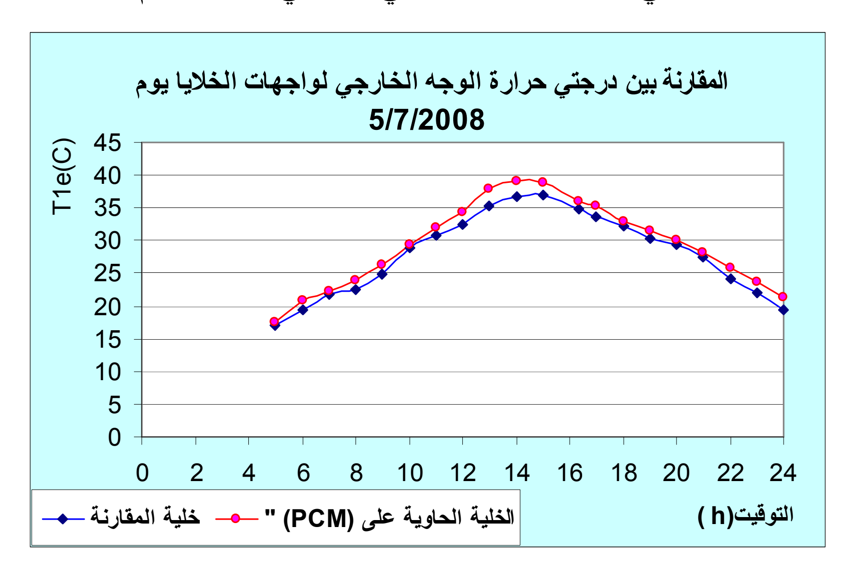


الشكل /5-18/ المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا
يوم 22/3/2008

ثالثاً : نتائج القياسات التي أجريت في يومي 5و 6 من شهر تموز 2008

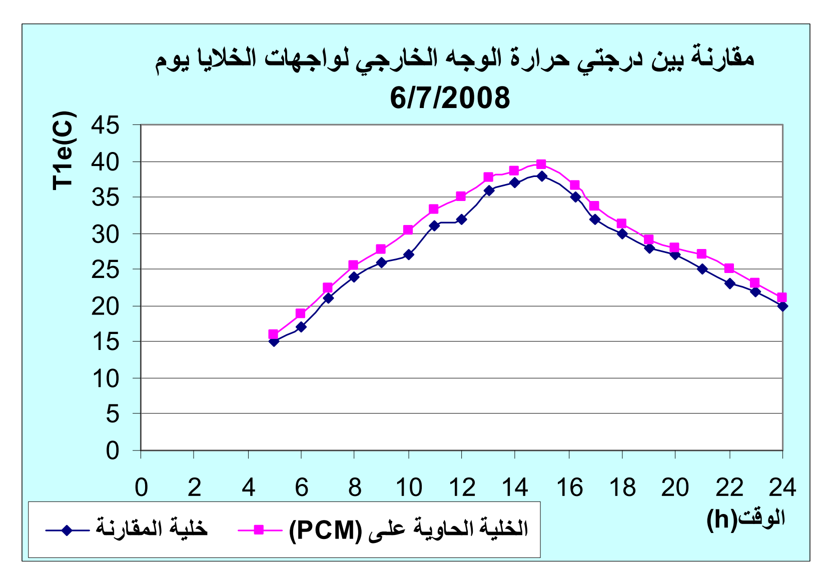
- ❖ الجو حار
- ❖ متوسط شدة الإشعاع الشمسي $I=800W/m^2$
- ❖ متوسط درجة الحرارة الخارجية $T_{ext}=26°C$

- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 5/7/2008



الشكل /5-19/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 5/7/2008

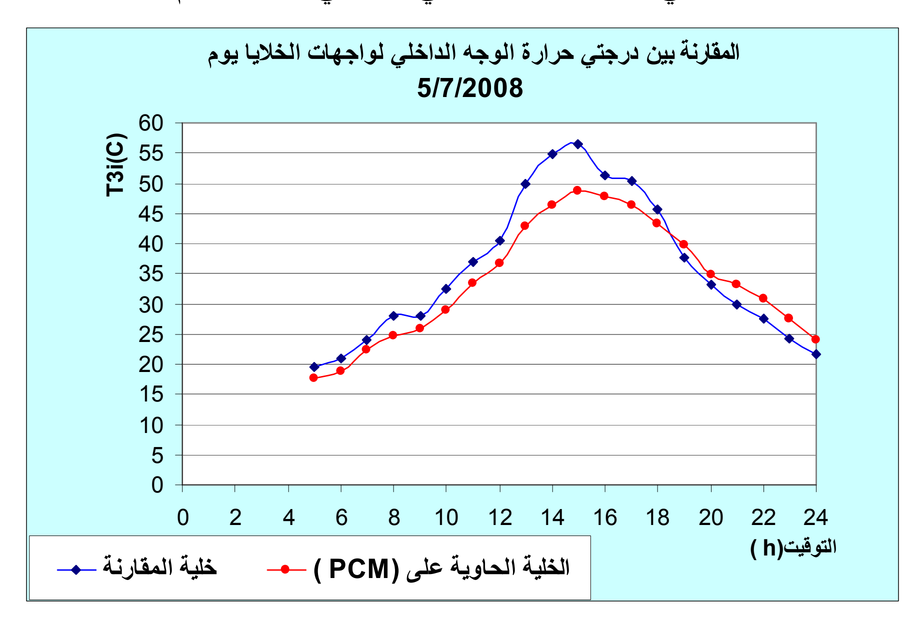
- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 6/7/2008



الشكل /5-20/ المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الخارجي لواجهتي الخليتين يوم 6/7/2008

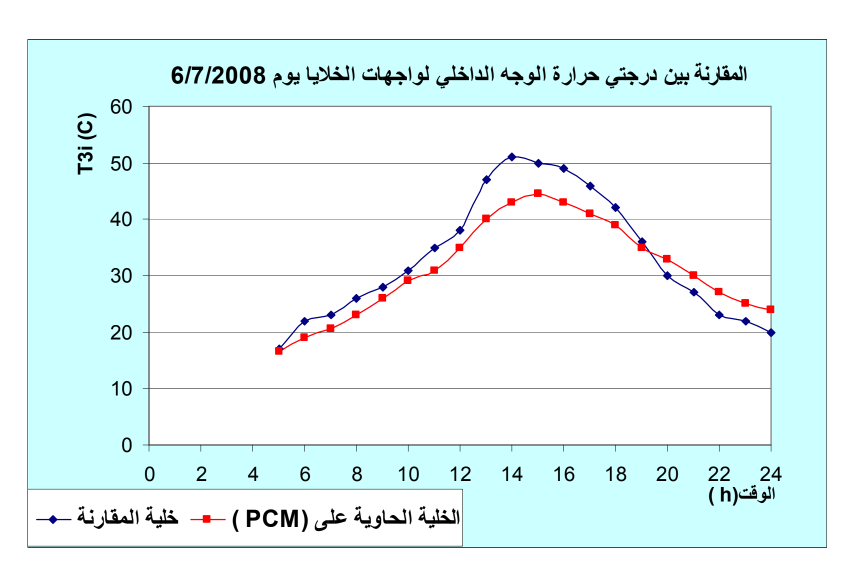


- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 5/7/2008



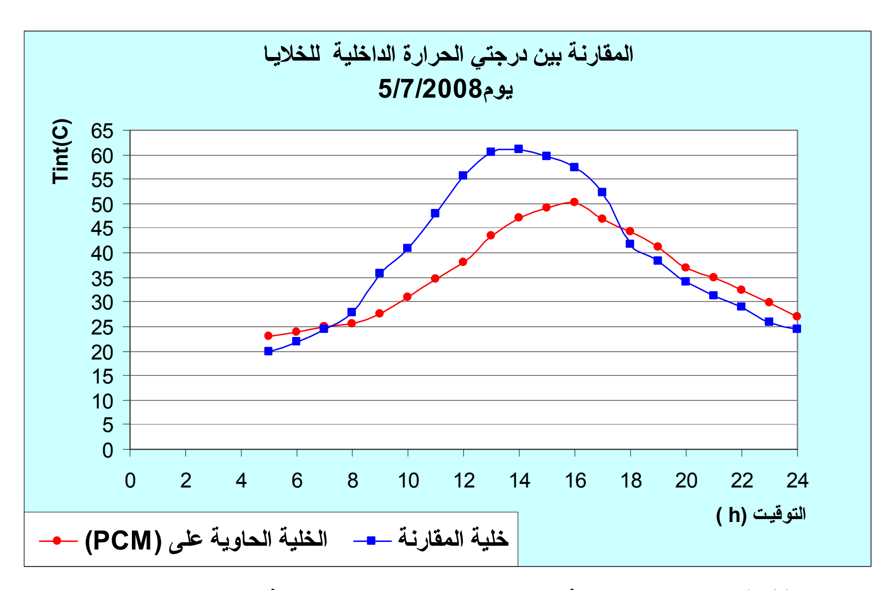
الشكل /5-21/المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 5/7/2008

- المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 6/7/2008



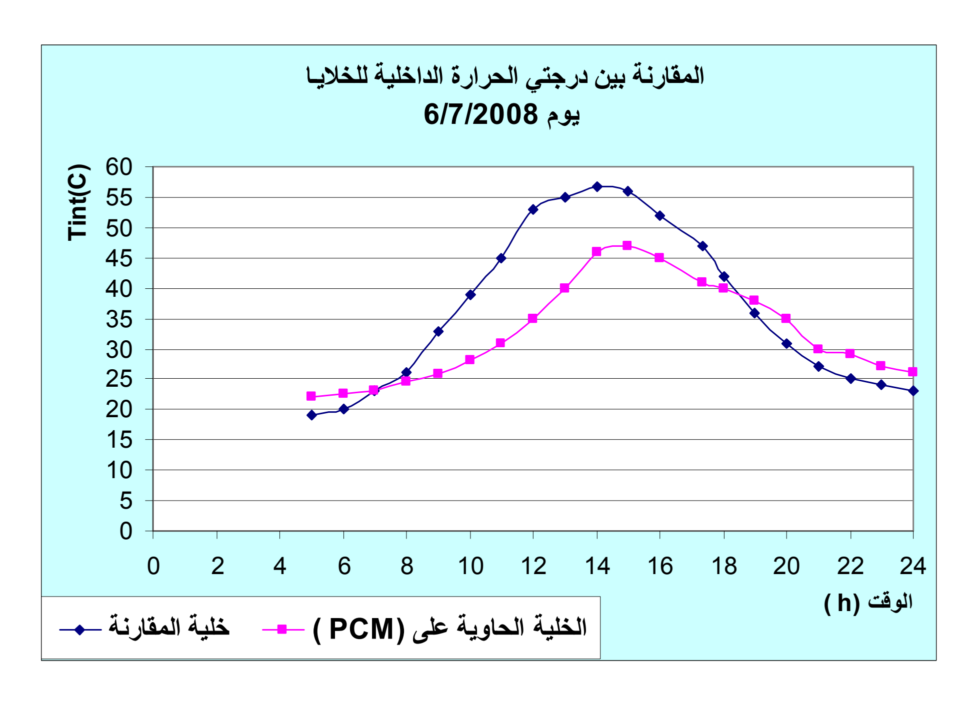
الشكل /5-22/المقارنة بين درجتي حرارة الوجه الداخلي لواجهتي الخليتين يوم 6/7/2008

- المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 5/7/2008



الشكل /5-23/ المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 5/7/2008

- المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 6/7/2008



الشكل /5-24/ المقارنة بين درجتي الحرارة الداخلية للخلايا يوم 6/7/2008

5-4-4-2 تحليل النتائج

من المخططات البيانية التي حصلنا عليها يمكن ملاحظة:

من خلال القياسات التي تم إجراؤها يومي 24–1/25/ (الجو بارد) نلاحظ:

- إن درجة حرارة الوجه الخارجي T1e للواجهة الحاوية على (PCM) كانت قريبة من نظيرتها في خلية المقارنة .
- درجة حرارة الوجه الداخلي T3i لواجهة الخلية الحاوية على (PCM) كانت أعلى من درجة حرارة الوجه الداخلي لخلية المقارنة بحدود **(0.5 -2.2°C)+**.
- درجة الحرارة الداخلية Tint للخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) كانت أعلى من درجة الحرارة الداخلية المقارنة بحدود **(0.5 - 2°C)+**

من خلال القياسات التي تم إجراؤها يومي 21–3/22/ (الجو معتدل) نلاحظ:

- إن درجة حرارة الوجه الخارجي T1e للواجهة الحاوية على (PCM) كانت دوماً أعلى من درجة حرارة الوجه الخارجي لخلية المقارنة.
- بلغت أعلى قيمة ل T1e يوم 21/3 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 39.43°C و قابلها في خلية المقارنة 33.68°C أي بفارق حوالي 5°C+ ، كما بلغت أخفض قيمة لها10.12°C قابلها في خلية المقارنة 8.70 °C أي بفارق حوالي1.5°C+.
- بلغت أعلى قيمة ل T1e يوم 22/3 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 37.8°C قابلها في خلية المقارنة 35.8°C أي بفارق حوالي 2°C+ ، كما بلغت أخفض قيمة لها11.2°C قابلها في خلية المقارنة 10.2 °C أي بفارق حوالي°C 1+.
- بلغت أعلى قيمة ل T3i يوم 21/3 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 41.65°C قابلها في خلية المقارنة 47.9°C أي بفارق حوالي 6°C− ، كما بلغت أخفض قيمة لها12.33°C قابلها في خلية المقارنة 9 °C أي بفارق حوالي3.5°C+.
- بلغت أعلى قيمة ل T3i يوم 22/3 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 39.8°C قابلها في خلية المقارنة 50.1°C أي بفارق حوالي 10°C- ، كما بلغت أخفض قيمة لها13.2°C قابلها في خلية المقارنة 11.5 °C أي بفارق حوالي°C 1.7+.
- بلغت أعلى قيمة ل Tint يوم 21/3 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 40.24°C قابلها في خلية المقارنة 46.8°C أي بفارق حوالي 6°C− ، كما بلغت أخفض قيمة لها13°C قابلها في خلية المقارنة 9.1 °C أي بفارق حوالي4°C+.

- بلغت أعلى قيمة ل Tint يوم 22/3 في الخليـــة ذات الواجهـــة الحاويـــة علـــى (PCM) 39.4°C قابلها في خلية المقارنة 43°C أي بفارق حوالي 4.5°C− ، كما بلغــت أخفــض قيمة لها14°C قابلها في خلية المقارنة 12.1 °C أي بفارق حوالي2°C+.

من خلال القياسات التي تم إجراؤها يومي 5−7/6/ (الجو حار) نلاحظ:

- إن درجة حرارة الوجه الخارجي T1e للواجهة الحاوية على (PCM) كانت أعلـــى مـــن نظيرتها في خلية المقارنة بحدود تراوحت بين (0.6-2.2°C)+ .
- بلغت أعلى قيمة ل T1e يوم 5/7 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 49.6°C قابلها في خلية المقارنة 55.5°C أي بفارق حوالي 6°C− ، كمـــا بلغـــت أخفـــض قيمـــة لها19.5°C قابلها في خلية المقارنة 17.6 °C أي بفارق حوالي°C 2+.
- بلغت أعلى قيمة ل T1e يوم 6/7 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 44.5°C قابلها في خلية المقارنة 50°C أي بفارق حوالي 5.5°C− ، كمـــا بلغـــت أخفـــض قيمـــة لها19°C قابلها في خلية المقارنة 16.5 °C أي بفارق حوالي°C 2.5+.
- بلغت أعلى قيمة ل Tint يوم 5/7 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 50.1°C قابلها في خلية المقارنة 61.1°C أي بفارق حوالي 10°C- ، كما بلغـــت أخفـــض قيمـــة لها°C 23.1 قابلها في خلية المقارنة °C 20 أي بفارق حوالي3°C+.
- بلغت أعلى قيمة ل Tint يوم 6/7 في الخلية ذات الواجهة الحاوية على (PCM) 46.9°C قابلها في خلية المقارنة 56°C أي بفارق حوالي 9°C− ، كما بلغت أخفض قيمة لها22°C قابلها في خلية المقارنة °C 19 أي بفارق حوالي3°C+.

5−5 الاستنتاجات

من خلال ما سبق فقد توصلنا إلى الاستنتاجات التالية:

- بفعل الطاقة الكامنة المخزنة في مادة PCM بلغ التحسن في درجة حرارة الوجه الـــداخلي للواجهة الزجاجية بحدود تراوحت بين **(0.5 -2.2°C)** ، كما بلغ التحســـن فـــي درجـــة الحرارة الداخلية للخلية التجريبية بحدود تراوحت بين **(0.5 - 2°C)** و ذلك خلال الفصل البارد من السنة الأشكال : /9-10-11-12/ .
- لقد ظهر تأثير مادة PCM بشكل واضح خلال الفصل الانتقالي من السنة و هذا ما نلاحظه في الأشكال :/15-16-17-18/ و ذلك نظراً للاختلاف الكبير في درجة الحرارة الخارجية ما بين الليل و النهار، حيث وجدنا أنه بفعل الطاقة الكامنة في مادة PCMو نتيجة التحـــول الطوري الذي حدث لها بفعل الطاقة المستمدة من أشعة الشمس فقد تحسنت درجة الحـــرارة الدنيا للوجه الداخلي بحدود تراوحت ما بين (1.7-3.5°C) و تحســـنت درجـــة الحـــرارة

العظمى بحدود تراوحت ما بين (6-10°C) ، أما بالنسبة لدرجة الحرارة الداخلية فبفعل الطاقة الكامنة في مادة (PCM) فقد تحسنت درجة الحرارة الدنيا بحدود تراوحت ما بين (2-4°C) ، و تحسنت درجة الحرارة العظمى بحدود تراوحت ما بين (4.5-6°C) .

- فرق درجات الحرارة الداخلية ما بين الليل و النهار يومي 21/3 و 22/3 كان بحدود 27°C و 25.4°C على الترتيب للخلية ذات واجهة PCM ، و كان 37.7°C و 31°C لخلية المقارنة . و هذا يوضح أن مواد PCM لعبت دوراً واضحاً في تقليل تقلبات درجة الحرارة الداخلية بين الليل و النهار.

في فصل الصيف لعبت مادة (PCM) دور ستارة قامت بحجب أشعة الشمس و منعت كل من درجة حرارة الوجه الداخلي و درجة الحرارة الداخلية من الارتفاع حيث بلغ الفرق بين القيمة العظمى لدرجة حرارة الوجه الداخلي للواجهة الحاوية على مواد (PCM) و خلية المقارنة يومي 5-6/7 الأشكال /21-22-23-24/ (5.5-6°C) . أما بالنسبة لدرجة الحرارة الداخلية فقد بلغ الفرق بين الخليتين (9-10°C) .

5-6 الخاتمة:

- تم بنجاح تركيب مادة (PCM) محلياً و بسعر زهيد جداً بحدود 8 ليرة سورية لكل كيلو غرام واحد من المركب في حين سعر الكيلو غرام الواحد من هذه المادة في أوربا بحدود واحد و نصف يورو و ذلك في أرض المعمل.
- من الناحية الاقتصادية فالمادة التي تم تركيبها هي مادة شبه مجانية فلم يتجاوز سعرها 75 ليرة سورية لكل $1m^2$ من مساحة الواجهة و هذا مبلغ زهيد لا يشكل إضافة ذات قيمة مقارنة مع تكلفة الواجهات المفرغة أو المملوءة بالأرغون أو حتى مقارنة مع تكلفة الستائر القماشية .
- بالاعتماد على النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها ، فإنه يمكننا القول أن مبدأ استخدام المواد ذات الطور المتغير في الواجهات الزجاجية هو قابل للتطبيق و فعال من الناحية الحرارية .و أثبتنا أيضاً أن استخدام هذه المواد في الواجهات يقلل من الكسب الحراري و من الضياع الحراري و ذلك لأنه يتم امتصاص القسم الأكبر من طاقة الأشعة الساقطة على الواجهة خلال التحول الطوري لمواد PCM .و بالتالي نستنتج أن الواجهات الزجاجية ذات الزجاج المضاعف المملوءة بمواد PCM هي حرارياً أكثر فعالية من نفس الواجهات المملوءة بالهواء.
- لقد تم تحقيق الأهداف التي وضعت في بداية هذا البحث المتمثلة باستخدام المواد ذات الطور المتغير في العزل الحراري للواجهات الزجاجية و الاستفادة الأعظمية من الطاقة

الشمسية للتحكم بشكل سلبي بدرجات الحرارة داخل الأبنية. كما تم تحسين خصائص العزل الحراري للواجهات الزجاجية و ذلك بزيادة العطالة الحرارية للواجهة باستخدام مواد (PCM) . و ذلك على الرغم من أننا لم نتمكن من مقارنة المادة التي قمنا بتركيبها محلياً مع المادة المماثلة لها والمتوفرة لدى الشركات المصنعة و بالتالي لا يمكن الحكم على مدى جودتها إلا بإجراء اختبارات لقياس الخصائص الحرارية لهذه المادة.

التوصيات و المقترحات :

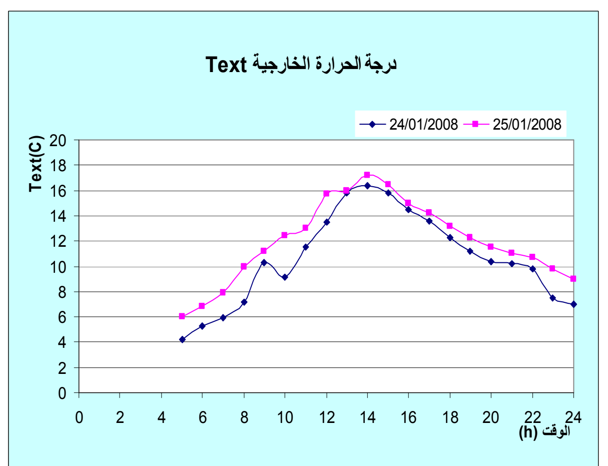
- يمكن الاستفادة من المادة في تظليل الواجهة و إعطاء اللون الخاص للواجهة بتلوين المادة حسب اللون المطلوب للواجهة.و يمكن تشكيل تصاميم فنية مختلفة في الواجهة بحيث تصبح هذه المواد جزءاً من الديكور الداخلي للبناء.
- يعتبر استخدام مواد (PCM) كمادة لتخزين الطاقة الكامنة في هياكل الأبنية من التطبيقات الحديثة جداً و الواعدة في مجال تقليل احتياجات الطاقة داخل البناء و يحتاج إلى الكثير من البحث و التجريب و المراقبة لدراسة كافة البيانات و الاختبارات المتعلقة بذلك مثلاً:
  - تجريب أنواع أخرى من مواد (PCM) في الواجهات الزجاجية أو استخدام مواد (PCM) في كافة عناصر البناء كالجدران الداخلية أو الخارجية و الأسقف و الأرضيات ، إضافة إلى المزاوجة فيما بين مصادر الطاقة التقليدية و تطبيقات مواد (PCM).
  - استخدام مواد ذات طور متغير أخرى و تجريب العديد منها للوصول إلى المادة المناسبة التي تحقق أفضل الشروط للاستخدام في الواجهات الزجاجية .
  - إن كود العزل السوري الصادر حديثاً لم يتطرق إلى ذكر هذه المواد على الإطلاق على الرغم من أن استخدام هذه المواد في هياكل الأبنية يمثل أحدث ما توصل إليه الباحثون في مجال الإدارة الطاقية للأبنية لذلك نقترح إضافة فصل خاص بالمواد ذات الطور المتغير و تطبيقاتها إلى كود العزل السوري و ذلك حتى يلائم التطور العلمي الحاصل في هذا المجال.

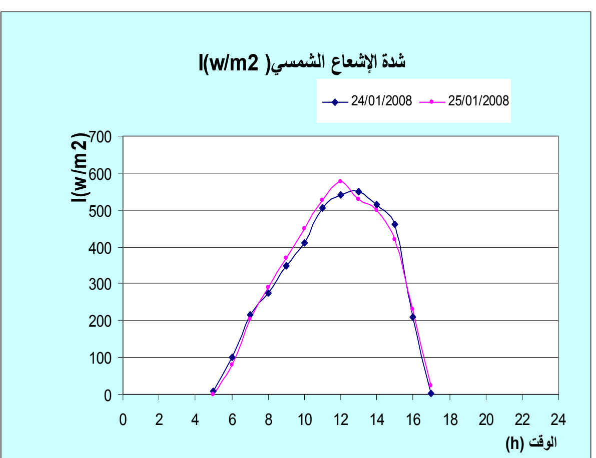
و بشكل عام يفتح هذا البحث المجال لأبحاث أخرى لتطوير تطبيقات جديدة تسهم في الاستفادة المثلى من دمج هذه المواد في هياكل الأبنية.

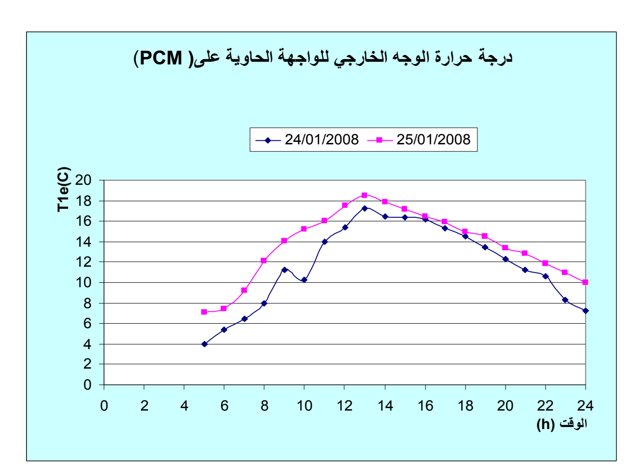
الملحق (A)

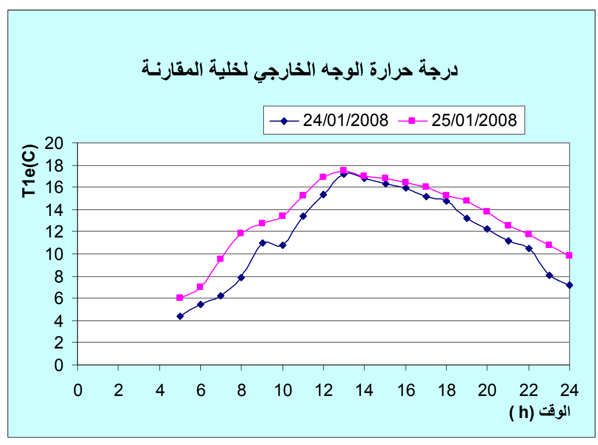
نبين فيما يلي نتائج القياسات التي تم إجراءها خلال أيام أخذ القراءات

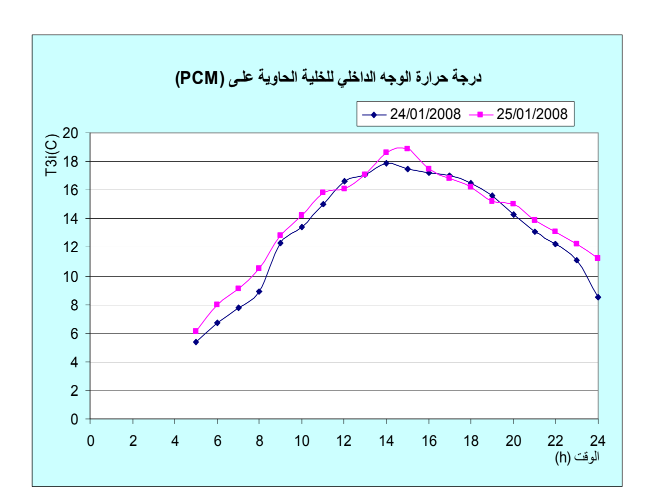
- نتائج القياسات يومي 24-2008/1/25

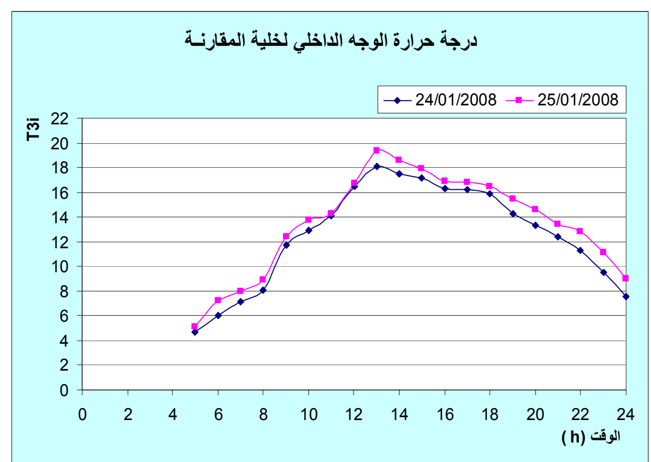


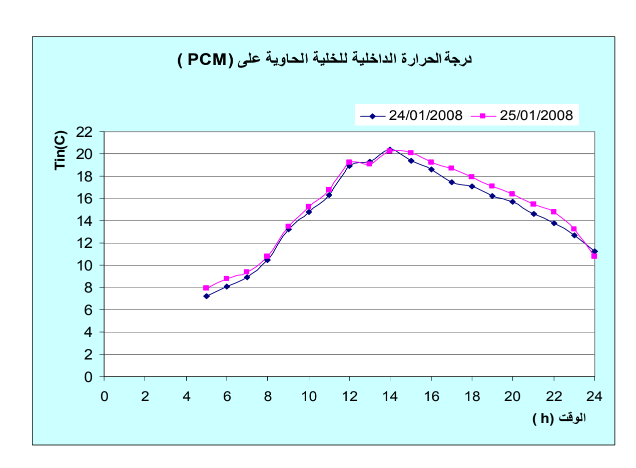


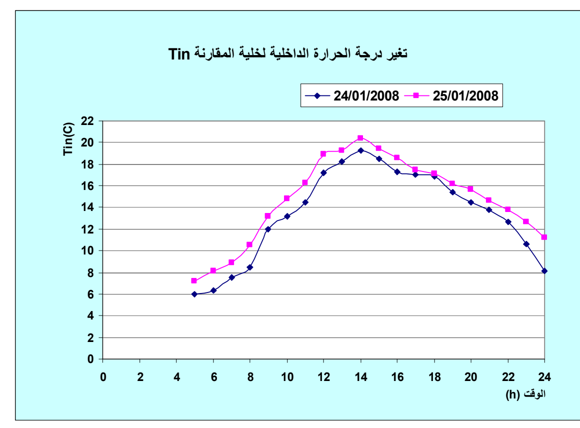




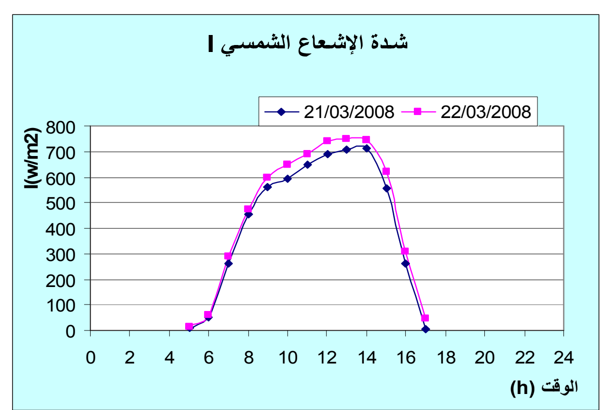

درجة حرارة الوجه الداخلي للخلية الحاوية على (PCM)
24/01/2008
25/01/2008
T3i(C)
الوقت (h)

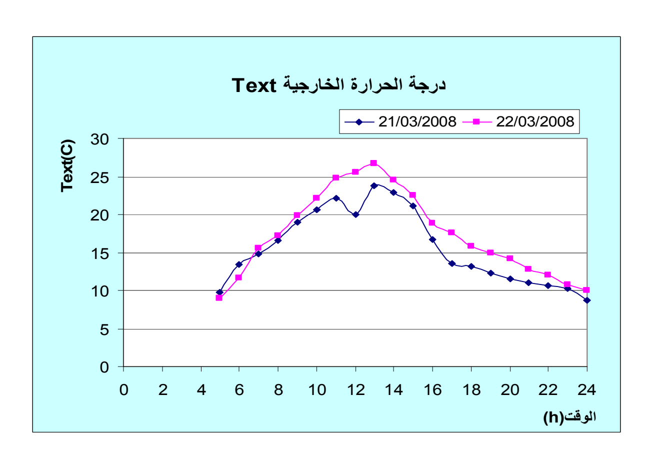

درجة حرارة الوجه الداخلي لخلية المقارنـة
24/01/2008
25/01/2008
T3i
الوقت (h)

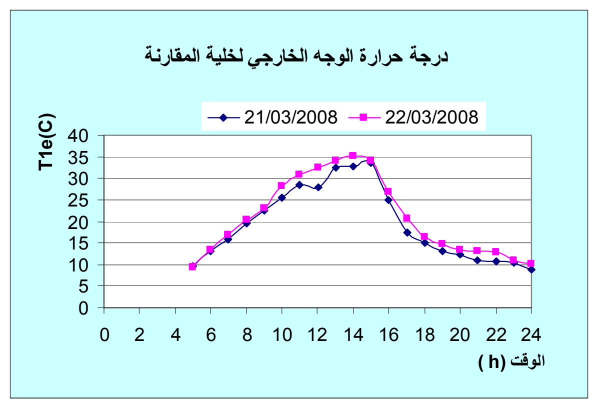

درجة الحرارة الداخلية للخلية الحاوية على (PCM)
24/01/2008
25/01/2008
Tin(C)
الوقت (h)

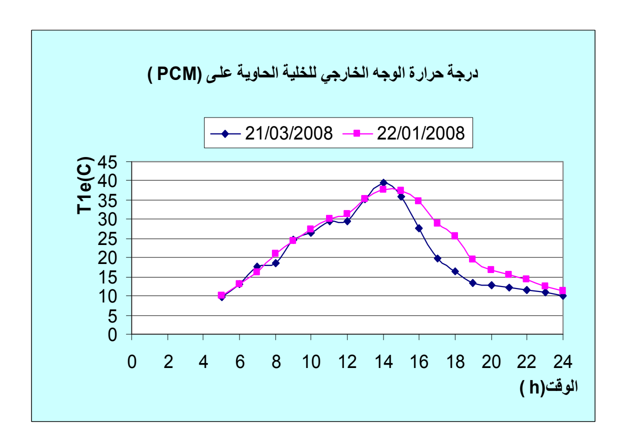

تغير درجة الحرارة الداخلية لخلية المقارنة Tin
24/01/2008
25/01/2008
Tin(C)
الوقت (h)

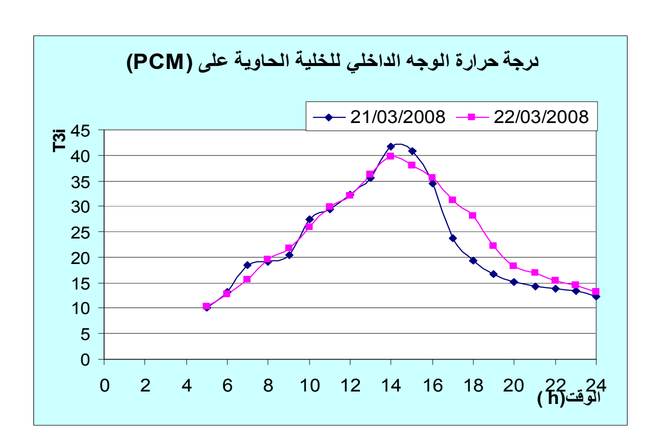
• نتائج القياسات يومي 21-2008/3/22

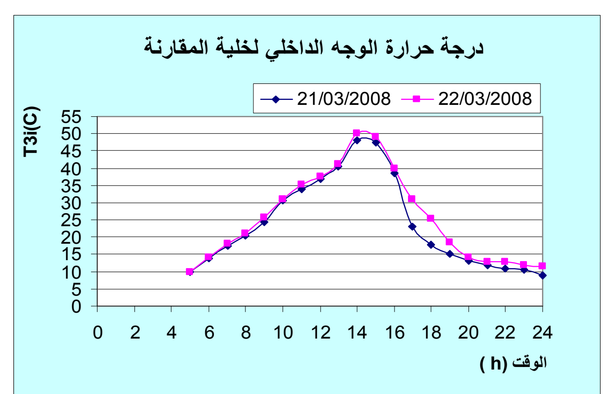


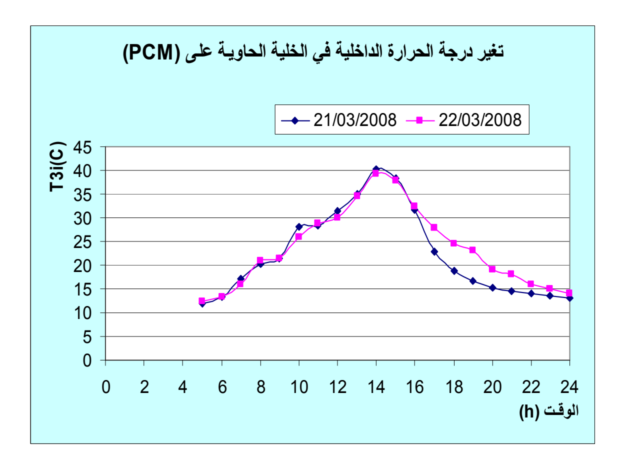


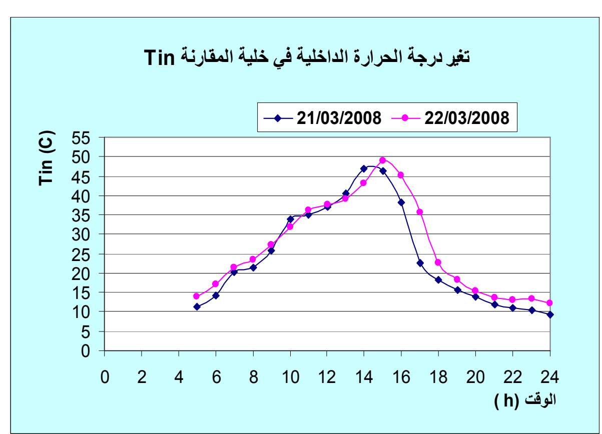




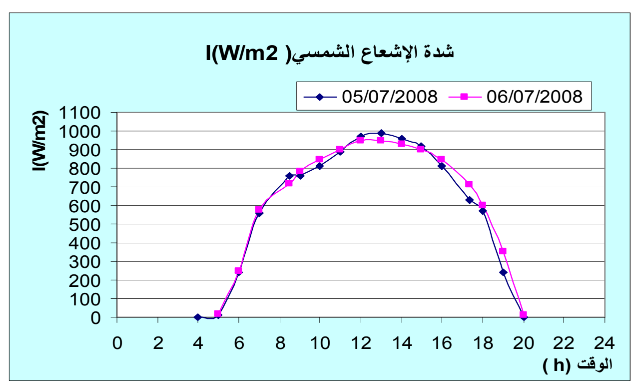

درجة حرارة الوجه الداخلي للخلية الحاوية على (PCM)
21/03/2008
22/03/2008
T3i
الوقت(h)

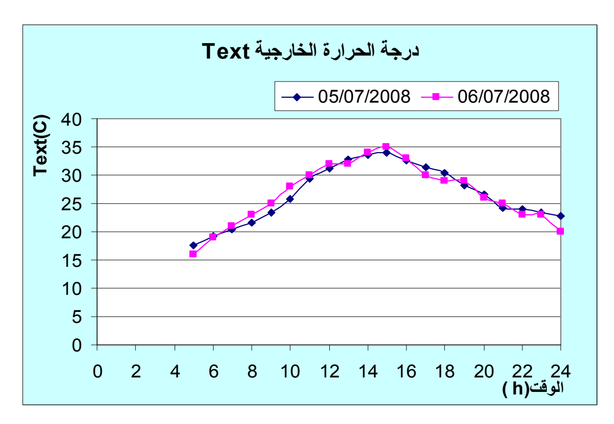

درجة حرارة الوجه الداخلي لخلية المقارنة
21/03/2008
22/03/2008
T3i(C)
الوقت (h)

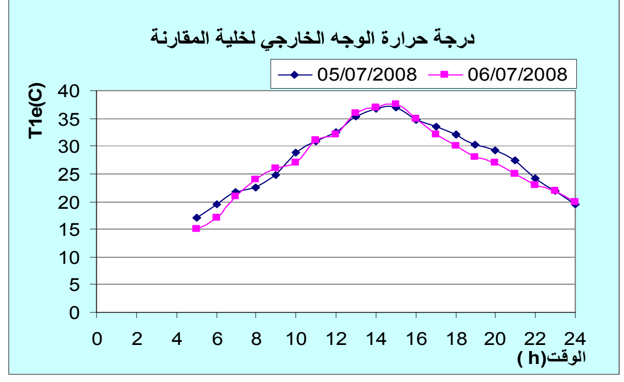

تغير درجة الحرارة الداخلية في الخلية الحاوية على (PCM)
21/03/2008
22/03/2008
T3i(C)
الوقت (h)

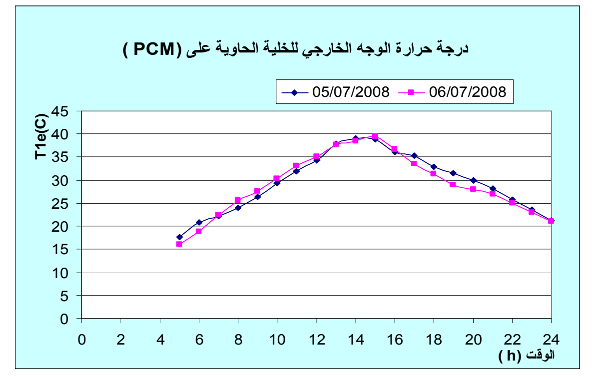

تغير درجة الحرارة الداخلية في خلية المقارنة Tin
21/03/2008
22/03/2008
Tin (C)
الوقت (h)

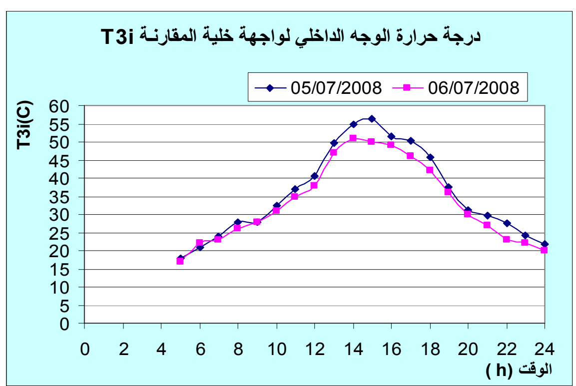
- نتائج القياسات يومي 5-2008/7/6

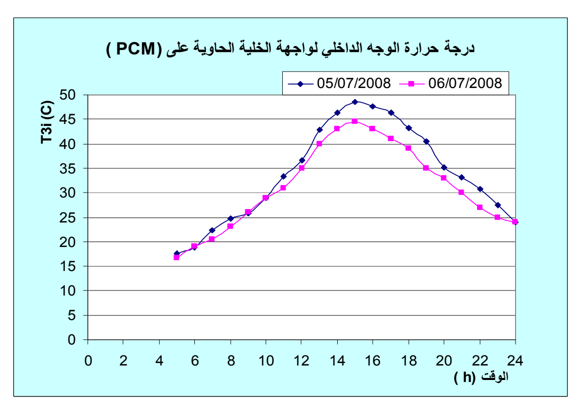


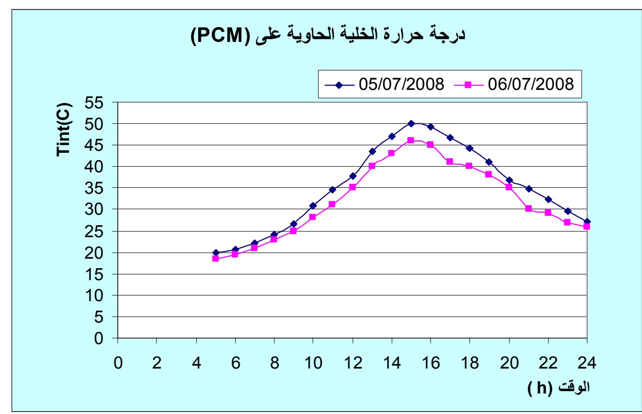


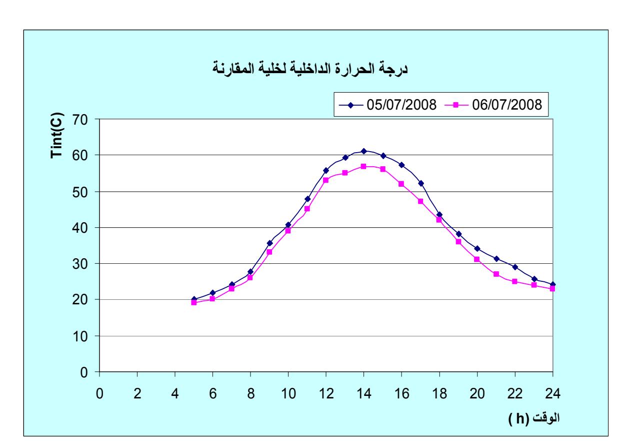





درجة حرارة الوجه الداخلي لواجهة خلية المقارنـة T3i
05/07/2008
06/07/2008
T3i(C)
(h) الوقت


درجة حرارة الوجه الداخلي لواجهة الخلية الحاوية على (PCM)
05/07/2008
06/07/2008
T3i (C)
(h) الوقت


درجة حرارة الخلية الحاوية على (PCM)
05/07/2008
06/07/2008
Tint(C)
(h) الوقت


درجة الحرارة الداخلية لخلية المقارنة
05/07/2008
06/07/2008
Tint(C)
(h) الوقت

دلالات الرموز :

Q : كمية الطاقة المخزنة (kJ)

a_m : نسبة الانصهار

a_r : نسبة التفاعل

Δh_m : الحرارة الكامنة للانصهار (kJ/kg)

Δh_r:حرارة التفاعل الممتصة (kJ/kg)

m :كتلة وسيط تخزين الحرارة kg

T_a : درجة حرارة الوسط المحيط $(^\circ C)$

T_f : درجة الحرارة النهائية $(^\circ C)$

T_i : درجة الحرارة الأولية $(^\circ C)$

T_m : درجة حرارة الانصهار $(^\circ C)$

C_P : الحرارة النوعية $(kJ / kg.K)$

H : الحرارة الكامنة للإنصهار

N عدد ألواح الزجاج

$h_{C,i}$:هو معامل انتقال الحرارة للفراغ الهوائي ($W/m^2.K$).

$h_{G,ext}$: معامل انتقال الحرارة الإجمالي بين الوسط الخارجي و سطح الواجهة الخارجي .($W/m^2.K$)

$h_{G,int}$: معامل انتقال الحرارة الإجمالي بين الوسط الداخلي و سطح الواجهة الداخلي ($W/m^2.K$).

λ : الإيصالية الحرارية (W/m.K).

α^*: امتصاصية الزجاج (لا بعدية).

b_1 : سماكة لوح الزجاج الخارجي (m).

b_2 : سماكة المادة ذات الطور المتغير PCM (m)

b_3 : سماكة لوح الزجاج الداخلي (m).

e : السماكة الكلية للواجهة الزجاجية.

C : السعة الحرارية الكتلية للمادة (KJ/Kg.K). للزجاج أو لمادة (PCM)

T درجة الحرارة (°C)

T_{1e},T_{1i} : درجة الحرارة على السطح الخارجي للوح الزجاج الخارجي للواجهة (1) ، درجة الحرارة على السطح الداخلي للوح الزجاج الخارجي للواجهة الملامس لمادة PCM على الترتيب .(°C)

T_{3e},T_{3i}: درجة الحرارة على السطح الداخلي للوح الزجاج الداخلي للواجهة (3) ، درجة الحرارة على السطح الخارجي للوح الزجاج الداخلي للواجهة الملامس لمادة PCM على الترتيب (°C).

T_i : درجة الحرارة في المنطقة I (°C).

T_{PC} : درجة حرارة التحول الطوري للمادة (°C).

U: معامل انتقال الحرارة الإجمالي ($W/m^2.K$).

x :اتجاه تقدم عملية الإنصهار (m).

a : معامل انتشار الحرارة $(\lambda / \rho.C)$،(m^2 / s) .

ε : إصداريه السطح (لا بعدية).

σ : ثابت ستيفان–بولتزمان $(W / m^2.K^4)$

ρ : الكثافة Kg/m^3 .

المراجع العلمية

1- Dietz, D. (1994). Thermal performance of a heat storage module using calcium chloride hex hydrate. Trans ASME 106: 106–111.
2-Ettouney, H.M., Alatiqi, I., Al-Sahali, M., Al-Ali, S.A. (2004). Heat transfer enhancement by metal screens and metal spheres in phase change energy storage systems. Renewable Energy 29: 841–860.
3-Fraunhofer. (2002). ISE www.ise.fhg.de
4-Gu, Z., Liu, H., Li, Y. (2004).Thermal energy recovery heat recovery system calculation and phase change material development. Applied Thermal Engineering 24: 2511–2426.
5-HREC- 5183-2LMSC-HREC D225138. NASA. Marshal Space Flight Center. Alabama
6-He, Q., Zhang, W. (2001). A study on latent heat storage exchangers with the high-temperature phase-change material. International Journal of Energy Research 25: 331–241.
7- Hong, H., Kim, S.K., Kim, Y.S. (2004). Accuracy improvement of t-history method for measuring heat of fusion of various materials. International Journal of Refrigeration 27: 360–366.
8- buildings. Proceedings of VI World Renewable Energy Congress. Brighton, UK: 2123–2126.
9-Huang, M., Eames, P.C., Norton, B. (2001). An experimental study into the application of phase
10-Lacroix, M. (1993b). Study of the heat transfer behavior of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube. Int J Heat Mass Transfer 36: 2083–2092.
11- Liu, Z., Chung, D.D.L. (2001). Calorimetric evaluation of phase change materials use as thermal interface materials. Thermochemica Acta 366: 135–147.
12- Neeper, D.A. (2000). Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. Solar Energy 68 (5):
393–403.
13- Sari, A., Kaygusuz, K. (2001). Thermal energy storage system using stearic acid as a phase change material. Solar Energy 71(6): 365 - 376

14- Sharma, S.D., Buddhi, D., Sawhney, R.L., Sharma, A. (2000). Design development and performance evaluation of latent heat storage unit for evening cooking in a solar cooker. Energy Conversionand Management 41: 1497–1508.
15- Shibutani, S. (2002). PCM Micro-capsule slurry thermal storage system for cooling in narita airport.

3rd Workshop of the IEA ECES IA Annex. 17 Tokyo, Japan. September 30–October 2.
16- Shumitomo Chemical Co. Ltd. (2004) November 2. http://www.sumitomo-chem.jp/english/division/
petro.html
17-Strith, U., Novak, P. (2002). Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation. IEA, ECES IA Annex 17. Advanced Thermal Energy Storage Techniques - Feasibility Studies and Demonstration Projects 2nd Workshop. Ljubljana, Slovenia
18- Takeda, S., Nagano, K., Mochida, T., Shoemakers, K. (2004). Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change materials. Solar Energy 77: 329–338.
19- Weinladerw; Beck, A., Fricke, J. (2004). PCM-facade-panel for day lighting and room heating. Solar Energy
20- Zalba, B., Marin J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering 23: 251-283.
21- J.L., He, S.M., Wu, K.Z., Liu, X.D. (2001). Thermal studies on the solid–liquid phase transition in binary systems of fatty acids. Thermochemica Acta 369: 157-60.
22- D.A Neeper , Thermal dynamic of wallboard with latent heat storage , solar energy .Vol. 68,pp. 393-402 , 2000 .
http://www.basf.de23-.
24- TEAP Web site , http // www.teappcm.com
25- CIBSC. (1999b) Guide A2 Thermal properties of building structures London, The Charted Institution of Engineers.
26-Telkes, M. (1986). Solar Energy Storage. Am Soc Heat Refrig & Air Cond Engrs: 38–44.
27-Yamaha, M., Syuku, K., Canbazoglu, S. (2001). A study on thermal characteristics of thermal storage tank using phase change materials installed in an air distribution system. Journal of Architectural Planning Environmental Engineering 549(11): 51–57.
28-WWW.RUBITHERM.Com
29-Kurklu, A., Wheldon, A.E., Hadley, P. (1999). Use of a phase change material (PCM) for frost preventionin a model greenhouse. *J Enging Sci Univ Pamukkale*
30-Takakura, T., Nishina, H. (1993). a solar greenhouse with phase change energy storage and a microcomputer control system. Acta Hort (Energy in Protected Cultivation) 115: 583–590.
31-Enibe, S.O. (2003). thermal analysis of a natural circulation solar air heater with phase change material energy storage. *Renewable Energy* 28: 2269–2299.

32-Buddhi, D., Sahoo, L.K. (1997). Solar cooker with latent heat storage: design and experimental testing. *Energy Conversion and Management* 38 (5): 493–498.
33-Domanski, R., El-Senaii, A.A., Jaworski, M. (1995). Cooking during off-sunshine hours using asstorage media. *Energy* 20(7): 607–616.
34-Zalba, B., Marin J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering 23: 251-283.
35-Buddhi, D. (1997). Thermal performance of a shell and tube pcm storage heat exchanger for industrial waste heat recovery. *Proc ISES Solar World Congress*. Taejon, Korea. August 24–29.

36-حنا، سهيل عبد الله، 2008 – التدفئة و التكييف ، كلية الهندسة المعمارية ، جامعة البعث .
37- كود العزل الحراري للأبنية في الجمهورية العربية السورية، المركز الوطني لبحوث الطاقة – وزارة الكهرباء

الأبحاث المنشورة :

المحفوض،هاشم–حنا،سهيل ،2008 – استخدام المواد ذات الطور المتغير في العزل الحراري للواجهات الزجاجية للأبنية الحديثة–مجلة جامعة البعث.

Phase change material implementations For thermal insulation in glass façade of modern building

Abstract

This research reviews Phase Change materials Implementation for thermal insulation in glass façade of modern building and the influence of (PCM) for moderate internal temperature and improve thermal comfort inside building by controlling of solar radiation penetrated through façade, and passively controlling with internal temperature where (PCM) store solar energy as a form of (LHS) and then (PCM) release energy stored when its phase change.

In this research:

1- We make an effort to gather the information from the previous works on PCMs (classifications, properties, and applications) and latent heat storage systems.

2- Theoretical and mathematical Study that describe heat transfer presses in glass façade filled with (PCM) by means off thermal conduction equations.

3- Experimental investigation to choose suitable (PCM) that has best thermal properties, available, low cost. As (PCM) material we formatted Eutectic its phase change material 18°C.

4- we made experimental investigation on tow model (experimental cells) one of them has glass façade filled with (PCM) and the other fill with air I used it for comparison.

As a result of this study we have many important results and we give suggestion which may improve the implementations (PCM) in building and may help other researcher in their study in the future:

1- we successfully format local (PCM) very low cost (about 8 SP per 1kg) .

2-Based upon the result from the present study, one can conclude that the proposed concept of PCM filled glass Façade system is viable and thermally effective.

3- its also confirmed that the PCM filling leads to filtering out the thermal radiation and reduces the heat gain or losses .

4-by energy stored in (PCM) the temperature of internal side of the façade was moderated at about 0.5-2.2 °C .and the internal temperature was improved at about (0.5-2°C) /In cold part of the year/.

5-by energy stored in (PCM) has a clear influence during transformation seasons of the year because of the big difference between day and night temperatures , we found that because of energy stored in PCM the internal temperature was improved at about (4-2°C)

6-in hot climate PCM was like a façade, it prevent the internal temperature from increasing, ant it moderate the internal temperature at about 5.5-6°C.